

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LA VARIABILITÉ DES CONDITIONS DU MICROSITE AFFECTE LA
RÉPONSE INITIALE DES PLANTS DE MÊLÈZE HYBRIDE EN
PLANTATION

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

MARIO BUITRAGO

FÉVRIER 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de maîtrise est présenté sous la forme d'un article scientifique dont je suis l'auteur principal suivi par les professeurs Christian Messier, Ph.D., Alain Paquette, Ph.D., Nelson Thiffault inf. f., Ph.D. et Nicolas Bélanger, Ph.D. J'ai effectué la majorité des échantillonnages et des analyses statistiques. Ce projet de recherche, qui est encadré dans le projet TRIADE, est le résultat d'une réflexion concernant le possible manque de fibres que connaîtra l'industrie forestière québécoise dans les décennies à venir. De plus, il a été conçu avec le but d'apporter des connaissances sur l'utilisation d'espèces forestières à croissance rapide dans la sylviculture intensive. Ainsi, l'article utilisé dans ce mémoire se veut un outil de consultation pour aider les sylviculteurs et les aménagistes forestiers dans la conception et l'application de leurs plans annuels d'intervention forestière intégrée.

La remise de ce mémoire me rend fier et heureux d'avoir vécu ce temps au sein de cette importante université et d'avoir eu le privilège de côtoyer des professeurs si intelligents, généreux, aidants, et d'une humanité profonde, cherchant tout le temps à faire avancer leurs étudiantes et étudiants. Merci Christian parce qu'avec ton expérience, tu as bien su faire revenir mes idées sur l'essentiel et éviter qu'elles ne s'envolent dans toutes les directions. Merci Alain, mon précieux appui, pour ton temps et pour ton engagement, pour venir me sauver les nombreuses fois où je me suis senti perdu ; tu es le grand architecte et guide de ce projet. Merci Nelson pour ta disponibilité généreuse et ta présence constante ; tu as contribué à ce que je me pose les questions nécessaires pour la suite de mes réflexions. Merci Nicolas, avec tes commentaires toujours pertinents, tu m'as bien orienté et rempli mes vides.

Un grand merci à Peter Gaucher, Christophe Jenkins, Maria Hänsel, Émilie Rousselle, Thomas André et Yann Gauthier, auxiliaires de terrain. Merci à Jacques Carignan, Steve Lemay et Dominic Létourneau, techniciens forestiers de la Direction de la recherche forestière (DRF). Merci à Daniel Lesieur pour son temps et ses conseils concernant le stockage des données. Merci à Nelson Thiffault et à Evelyne Gaillard pour leur aide avec les analyses de laboratoire. Bien que j'aie réalisé toutes les analyses statistiques sur les données, cela n'aurait pas été possible sans l'importante collaboration de mes directeurs et d'Isabelle Auger (statisticienne de la DRF). Merci à Dylan Craven pour ses commentaires concernant la rédaction de l'article en anglais. Je remercie les professionnels de recherche du CEF et je tiens aussi à souligner les contributions de Sara Bastien-Henri, Kim Bannon, Cornelia Garbe, Cynthia Pattry, Jean-Bastien Lambert, Sandrine Gauthier-Éthier, Bastien Lecigne, Nathalie Guerrero, Jorge Ramírez, Sophie Cerpentier, Isabelle Laforest-Lapointe, Charles Nock et Rebecca Tittler.

Finalement, je tiens à remercier le Ministère des Ressources naturelles du Québec, la Direction de la recherche forestière, le programme MITACS, et le personnel de Produits forestiers Résolu, qui ont grandement contribué, logistiquement et économiquement, à la réalisation de cette recherche.

RÉSUMÉ

Au Québec, l'intérêt pour la mise en œuvre de nouvelles façons d'aménager les forêts afin de concilier la protection de la biodiversité avec la production de bois est de plus en plus marqué. Dans ce contexte, la sylviculture intensive (production élevée de bois sur une superficie limitée), est perçue comme étant un outil important pour l'atteinte de ces deux objectifs.

Un des volets de la sylviculture intensive s'appuie sur la culture d'essences à croissance rapide, mises en terre sur des terrains préparés mécaniquement. Un enjeu important est de trouver un optimum entre la maximisation de la survie et de la croissance des espèces d'intérêt, et la minimisation des impacts de la préparation de terrain sur le sol et l'environnement. L'objectif de ce projet de recherche a été d'identifier la préparation de terrain la plus convenable pour la croissance des plants de mélèze hybride (MEH) (*Larix x marschlinsii* Coaz), et en même temps, celle qui a le moins d'impact environnemental. Parallèlement, nous prétendions apporter des connaissances sur la réaction des plants forestiers à la profondeur de mise en terre et aux facteurs du microsite modifiés par la préparation mécanique du sol. Nous avons voulu établir un gradient de perturbation du microsite, pour tester si : *i*) la réponse des plants serait directement proportionnelle à l'intensité de la perturbation du microsite de plantation, issue de la préparation de terrain et si *ii*) les plants plantés en profondeur (3–10 cm) auraient une meilleure performance que ceux plantés de la façon traditionnelle (0–3 cm). Nous avons établi un dispositif expérimental qui a été reboisé au printemps 2010 avec des plants de MEH, une espèce à croissance rapide et exigeante en ressources. Pour chaque plant, nous avons mesuré, à trois reprises (printemps et automne 2010 et automne 2011), son diamètre au niveau du sol et sa hauteur totale. De plus, nous avons choisi quatre plants par placette d'échantillonnage pour faire un suivi plus fin des facteurs qui influencent leur croissance et survie : la température du sol, son contenu en eau, l'état nutritionnel des plants et la couverture végétale autour d'eux. Des analyses de variance et la modélisation des relations entre les différents facteurs par l'utilisation d'équations structurelles (SEM) ont été utilisées pour le traitement des données.

Nos résultats indiquent que la croissance et la survie des plants n'ont pas eu de relation directe (ni indirecte) avec le gradient de perturbation du microsite. C'est-à-dire que le fait d'augmenter l'intensité de la perturbation du microsite ne signifie pas une augmentation de la croissance et de la survie des plants. De plus, il n'y a pas eu

d'importantes différences en croissance, ni pour les traitements de scarifiage ni pour les profondeurs de mise en terre. À partir de l'analyse SEM, nous avons observé que la croissance des plants a été affectée légèrement et négativement par la température et le contenu en eau du sol. Ces résultats aussi montrent que la croissance des plants a été positivement affectée par la concentration des nutriments dans les feuilles. Et finalement, de façon inattendue, la végétation autour des plants a eu une forte et positive influence sur l'état nutritionnel des plants, influence qui n'a pas été aperçue à la profondeur de 3 – 10 cm. Nos résultats montrent un ensemble d'effets positifs et négatifs sur les plants, issus de l'interaction de ces derniers avec les traitements et la végétation autour d'eux. Cela a fait en sorte qu'en moyenne, la réponse des plants est similaire parmi les différents traitements.

En plus de fournir des connaissances nouvelles sur des méthodes innovatrices de préparation du sol, nos résultats ont un impact direct sur la planification des activités forestières dont le but est l'optimisation de l'établissement des plants. Dans le cadre de cette recherche, la croissance et la survie des plants de MEH était similaire sans égard au traitement utilisé. Par conséquent, le choix opérationnel peut se faire sur le traitement le moins cher (simple passage de scarificateur à disque) ou celui qui a le moindre impact environnemental (inversion à l'aide de la pelle mécanique). Concernant la profondeur de mise en terre, vu que la plantation profonde n'a pas d'effet négatif sur la croissance et la survie, il serait préférable de la promouvoir ou, à tout le moins, cesser de la pénaliser afin de contrer le déchaussement et éviter ou diminuer l'éjection par le gel. Toutefois, étant donnée la sensibilité du MEH aux sols inondés, il est important de privilégier les microsites élevés. Le traitement en inversion, combiné avec une mise en terre profonde, semble être la meilleure alternative, puisque les inversions sont un des traitements qui ont un moindre impact environnemental, représentent un moindre danger pour les reboiseurs et les débroussailliers et procurent aux plants un microsite libre de compétition pour au moins les deux premières années. Or, vu que les inversions peuvent être un microsite davantage sec, la mise en terre profonde, assure aux plants un accès plus rapide (en comparaison avec la mise en terre peu profonde) à l'eau du sol et à la couche de matière organique enterrée sous le sol minéral.

Mots-clefs : Modélisation en équations structurelles, nutrition, microsite, mélèze hybride, préparation mécanique de terrain, TRIADE, profondeur de mise en terre.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	iii
RÉSUMÉ	v
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
0.1 Problématique.....	1
0.2 État des connaissances.....	4
0.2.1 Caractéristiques écologiques du mélèze hybride	4
0.2.2 Les relations plante-environnement	4
0.2.3 Végétation autour des plants : facilitation et compétition.....	7
0.2.4 La préparation mécanique du terrain.....	9
0.2.5 Profondeur de mise en terre	15
0.3 Méthodologie.....	16
CHAPITRE I	
HYBRID LARCH EARLY PERFORMANCE; EFFECTS OF SITE	
PREPARATION, PLANTING DEPTH AND LOCAL VARIATION IN ABIOTIC	
AND BIOTIC CONDITIONS	17
1.1 Abstract.....	19
1.2 Introduction.....	20
1.3 Material and methods	22
1.3.1 Study area and site description.....	22
1.3.2 Experimental design and treatments	23
1.3.3 Seedling measurements	27
1.3.4 Seedling nutrition and microsite characteristics.....	28
1.3.5 Statistical analyses.....	29
1.4 Results	30

1.4.1 Seedling dimensions, survival and foliar nutrients.....	30
1.4.2 Soil and microsite variables.....	32
1.4.3 Structural equation modeling (SEM).....	33
1.5 Discussion	37
CONCLUSION GÉNÉRALE	41
RÉFÉRENCES	47

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Layout of the split-split-plot experimental design with details of one experimental unit. Each block (a) was divided into six main plots (b) which were treated with six mechanical site preparation methods (Simple, Double adjacent, Double intensive, Inversions, Mounds, and Partial intensive (see Table 1.1); the latter is pooled with Double intensive for this study). These main plots were divided again into two subplots (c), which were planted with hybrid larch seedlings at one of the two planting depths (0–3 cm; 3–10 cm). Finally, two circular parcels (d) were established inside each subplot as sampling units. All treatments within plots and subplots were assigned randomly.....	24
1.2	Schematic representation of the site preparation treatments: Simple, Double adjacent, Double intensive (including Partial intensive), Inversion and Mounds.....	27
1.3	Mean height and ground-level diameter of hybrid larch seedlings at time of planting and after first two growing seasons as influenced by site preparation and planting depth. Results are presented as mean \pm SD. See Table 1.1 for description of treatments.....	35
1.4	Results of structural equation modeling (SEM) analysis applied on a subsample (N=286) of hybrid larch seedlings planted at two plantation depths, a: 0–3 cm and b: 3–10 cm. White squares and circles are factors affecting response variable (Grey squares). The circle represents a foliar nutrient-based latent variable (foliar N, foliar P and foliar Ca). Arrows are causal paths and thickness reflects significance of the coefficients values (0 to 1), with one being the strongest value (solid lines: positive; dash lines: negative). All possible links were tested but only significant ($P < 0.05$) links and their standardized values are presented (* $P < 0.08$). For clarity, error paths are omitted.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Description of the five site preparation treatments: Simple, Double adjacent, Double intensive (Double intensive + Partial intensive*), Inversion and Mounds (see also Figure 1.2).....	26
1.2	ANOVAR results for hybrid larch growth as influenced by five site preparation methods, two plantation depths and time (initial dimensions plus two growing seasons).....	32
1.3	Treatments effects on microsite variables measured in 2011	35
1.4	Test values and explained variance (R^2) of the SEM model factors (see Figure 1.4), and their effects on height growth of hybrid larch seedlings	37

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 Problématique

La Stratégie de protection des forêts de 1994 (Gouvernement du Québec, 1994) a été à la base de nombreux changements au régime forestier québécois, ainsi que la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise (Gouvernement du Québec, 2004). Elles suggéraient notamment un scénario dans lequel la région de la Mauricie (et probablement le Québec entier) connaîtrait un manque de fibres dans les décennies à venir. Ceci a stimulé l'intérêt envers le zonage fonctionnel et la sylviculture intensive avec des espèces à croissance rapide dont les mélèzes hybrides (MEH), comme solutions potentielles pour combler les besoins en matière ligneuse. Cependant, le succès de ces approches nécessite plusieurs ajustements.

Cette recherche est encadré dans un projet pilote de grande envergure entrepris en 2003 en Haute-Mauricie, dont l'objectif général est le développement durable de la forêt via une stratégie de zonage fonctionnel (TRIADE) en trois fonctions (zones) fondamentales : la production forestière (~20%), l'aménagement écosystémique (~69%) et la conservation (~11%) (Messier, Bigué et Bernier, 2003 ; Messier *et al.*, 2009). Par rapport à la première de ces trois fonctions, l'aménagement à y appliquer repose principalement sur des pratiques sylvicoles classiques comme les éclaircies. Cependant, y prendra place aussi la sylviculture intensive, élément incontournable de la TRIADE, mais dans une moindre proportion ; l'objectif est d'obtenir plus de 10% de la production totale en bois sur moins de 2 % du territoire.

Les plantations intensives sont importantes pour le succès de la TRIADE afin de compenser les pertes de production occasionnées par l'augmentation d'aires

protégées et la mise en place d'une stratégie d'aménagement extensif sur ~69% du territoire. Il est donc primordial de bien s'assurer que la croissance de ces plantations soit au rendez-vous. Pour garantir le succès des plantations intensives, il est important de préparer le terrain à reboiser. Ce traitement favorise l'établissement des plants (Sutton, 1993) et peut réduire le nombre d'interventions de dégagement des plantations après la mise en terre. Le dégagement est une activité coûteuse (Gagné et Paquette, 2008), qui requiert d'une main d'œuvre de plus en plus rare au Québec (Groupe Del Degan, 2008). Néanmoins, très peu de connaissances sont disponibles pour guider les sylviculteurs et aménagistes dans la réalisation de ces travaux, notamment pour le MEH, un hybride dont les rendements, estimés à 5 – 8 m³/ha/an (Messier, Bigué et Bernier, 2003), sont prometteurs pour le Québec. À ce sujet, la plupart des guides sylvicoles préconisent une préparation intensive du sol afin de maximiser la croissance et la survie des plants suite à la mise en terre (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Prévost et Thiffault, 2013 ; von der Gönna, 1992).

Un autre facteur important concernant la plantation de semis est la profondeur de la mise en terre. Au Québec, la mise en terre de plants doit se faire de la façon traditionnelle, c'est-à-dire que le collet doit rester au niveau de la surface du sol ou jusqu'à un maximum de 3 cm de profondeur ; sinon, la plantation risque d'être pénalisée financièrement. Pourtant, il n'existe aucune base scientifique qui appuie l'application de ces mesures (Paquette, Girard et Walsh, 2011). Bien au contraire, plusieurs études menées sur d'autres conifères indiquent plutôt des résultats neutres (Gemmel, Nilsson et Welanders, 1996) ou même positifs (Paquette, Girard et Walsh, 2011 ; Sutton, 1995), en termes de croissance et de survie, lorsque le collet des plants est établi à plus de 5 cm sous la surface du sol. Ce sujet est d'une importance particulière pour la sylviculture intensive puisque les reboiseurs, ayant pour mandat de planter superficiellement, peuvent éventuellement laisser des plants vulnérables au déchaussement et/ou à l'éjection par le gel.

D'autres facteurs sont aussi importants à considérer. Paquette et Messier (2011) mentionnent que la mise en place des plantations forestières fait face à des problèmes d'acceptation sociale, car elles sont souvent perçues comme étant des « déserts biologiques ». Gagné et Paquette (2008) rapportent qu'une préparation mécanique du terrain (scarifiage) plus localisée pourrait réduire les impacts visuels et environnementaux négatifs des plantations en favorisant le maintien d'une plus grande diversité végétale dans ces plantations. De plus, Paquette et Messier (2010) et Thiffault et Roy (2011) rapportent que les plantations intensives peuvent fournir de nombreux services écologiques tels que la séquestration du carbone, la restauration des terres dégradées et la protection indirecte des forêts naturelles. Dans ce contexte, des techniques de préparation localisées, conjuguées à un aménagement écosystémique sur la majorité du territoire, seraient en mesure de procurer le rendement économique et l'acceptation sociale des plantations. Elles favoriseraient aussi la protection de la biodiversité et des écosystèmes en utilisant de moins en moins les forêts naturelles. Cela cadre bien avec l'objectif de la TRIADE de diminuer la pression sur les forêts et maintenir les quantités de fibres nécessaires pour en combler les besoins (Messier, Bigué et Bernier, 2003).

Les études sur l'établissement des plants ont été orientées vers l'effet des traitements à l'échelle du traitement ou de la plantation (Thiffault et Jobidon, 2006 ; Thiffault, Jobidon et Munson, 2003) ; peu d'entre elles se sont attardées à l'échelle du plant et de son microsite. Ce manque de connaissances est particulièrement important pour les mélèzes exotiques (Gagné et Paquette, 2008). Ce projet de recherche léguera un réseau de placettes permanentes pour le suivi à long terme de la croissance en fonction des traitements de scarifiage, de profondeur de mise en terre, de gestion de la végétation de compétition et des caractéristiques du microsite et de la station. Les résultats de cette étude seront très importants pour l'ensemble des professionnels en foresterie au Québec, considérant qu'il y a de l'intérêt pour augmenter la production de bois et de fibres.

0.2 État des connaissances

0.2.1 Caractéristiques écologiques du mélèze hybride

Le MEH utilisé au Québec, est un hybride naturel entre le mélèze d'Europe (*Larix decidua* Mill.) et celui du Japon (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) (Bergès et Chevalier, 2001). Il exige beaucoup de lumière, de sols humides (Carter et Selin, 1987), profonds, bien drainés, chauds, bien aérés et moyennement fertiles (Bergès et Chevalier, 2001 ; Perron et Mottet, 2010). Bergès et Chevalier (2001) suggèrent de ne pas planter le MEH sur des sols très acides ou carbonatés près de la surface. Rawinski, Bowles et Noste (1980), dans une étude réalisée au nord du Wisconsin, signalent que le MEH se développe bien dans une gamme de pH de 5 – 6 et qu'il n'a pas besoin de contenus élevés de matière organique, mais ils n'indiquent pas de valeur de référence. Au contraire, Bélanger et Paré (2005) indiquent que la matière organique est potentiellement importante pour cette espèce. Robbins (1985) souligne que les mélèzes non indigènes de l'Amérique du nord sont très fragiles quant au gel au début du printemps et à l'automne à cause du débourrement hâtif et du début de dormance tardif, respectivement. Pourtant, Bergès et Chevalier (2001) indiquent que le MEH y est plus résistant que ses parents. La croissance des mélèzes est conditionnée sérieusement par la compétition en lumière. Cette contrariété pourrait être combattue par une préparation de terrain efficace et un contrôle périodique de la compétition (Robbins, 1985). La performance des mélèzes est aussi conditionnée par leurs ennemis naturels dont des maladies (Chancre du mélèze, Chancre scléroderrien, Rouge des aiguilles, maladies des racines), des insectes (tenthrède du mélèze, porte-case du mélèze) et quelques animaux vertébrés (Robbins, 1985).

0.2.2 Les relations plante-environnement

Les plantes ont besoin (en majeure ou moindre proportion) de lumière, d'eau, d'air, de carbone et de nutriments. Pour qu'elles aient une performance à la hauteur de celle qui est attendue, les niveaux de ces ressources doivent se rapprocher des

conditions optimales. Si ces conditions ne sont pas rencontrées, les plantes subiront du stress affectant leur physiologie, leur croissance, leur survie et même leur performance future (Margolis et Brand, 1990). Dans ce contexte, les conditions physiques et chimiques du sol (température, humidité, densité, texture, structure, disponibilité de nutriments, capacité d'échange cationique, pH, toxicité, etc.) et de l'atmosphère (température et humidité de l'air, vitesse du vent, nébulosité, pollution, etc.) jouent un rôle important sur la disponibilité des ressources (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991 ; Margolis et Brand, 1990 ; Spittlehouse et Stathers, 1990). Bien que la végétation de compétition et l'état de santé des plantes soient des facteurs importants affectant la prise de ressources (Beadle et Sands, 2004), Kozlowski, Kramer et Pallardy (1991) considèrent les facteurs environnementaux comme étant les principaux responsables. Pour les plants mis en terre, le principal problème est l'absorption d'eau dû au stress du passage de la pépinière au terrain (Burdett, 1990 ; Margolis et Brand, 1990). Burdett (1990) rapporte que des plants d'épinettes noire et blanche perdaient leur turgescence deux mois après la mise en terre dans des terrains, pourtant, suffisamment approvisionnés en eau.

La disponibilité d'eau et de nutriments est fortement conditionnée par le type de dépôt et par le pH du sol (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991). Un sol à texture grossière (sableux) aura un bon drainage, une bonne aération mais une rétention faible d'eau et de nutriments. Au contraire, un sol à texture fine (argileux) aura une bonne rétention d'eau et de nutriments mais un mauvais drainage et une aération déficiente. Un sol à texture moyenne sera intermédiaire (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991). Le pH du sol affecte également, de façon importante, la disponibilité de nutriments. Costello *et al.*, (2003) mentionnent que les valeurs de pH favorables pour la majorité de plantes se situent entre 5.5 et 7. Des valeurs de pH en dessous de 5.5 peuvent signifier une réduction de la disponibilité de calcium, d'azote, de phosphore et de magnésium entre autres, tandis qu'un pH par-dessus de 7, pourrait affecter la disponibilité de fer, de manganèse, de zinc et de cuivre (Costello *et al.*,

2003). Les sols acides peuvent favoriser davantage la solubilité d'éléments comme l'aluminium, le fer et le manganèse à des niveaux toxiques pour les plantes et les microorganismes. Finalement, le pH peut influencer négativement aussi le fonctionnement des cellules racinaires, affectant ainsi l'absorption d'eau et de nutriments (Costello *et al.*, 2003).

La température du sol et de l'air affectent aussi la disponibilité d'eau (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991). À basses températures, la viscosité de l'eau augmente et la production des racines fines diminue ce qui rend l'absorption d'eau et de nutriments plus difficile (Margolis et Brand, 1990 ; Örlander, Gemmel et Hunt., 1990). Spittlehouse et Stathers (1990), mentionnent qu'un sol saturé d'eau devient froid plus facilement qu'un sol sec en plus de réduire la disponibilité en oxygène au niveau des racines. Beadle et Sands (2004) signalent qu'une plante sous stress hydrique n'utilise pas la lumière avec l'efficacité habituelle et même qu'une lumière trop intense peut être nuisible pour elle.

Les conditions de l'atmosphère et du sol interagissent avec les différentes parties des plantes (dont feuilles et racines) affectant ainsi leur réponse photosynthétique. Par exemple, la photosynthèse augmente avec la température, mais à des températures trop élevées, le taux photosynthétique diminue (Kozlowski *et al.*, 1991) ; cependant, la tolérance aux températures élevées varie avec l'espèce (Mooney et Ehleringer, 2009). Si le sol est trop froid l'absorption d'eau et de nutriments par les racines devient déficiente, affectant ainsi la photosynthèse. De même, si la température du sol est trop élevée et combinée avec d'autres facteurs environnementaux (par exemple le manque d'eau dans le sol), les racines pourraient être endommagées de manière irréversible (Agrios, 2005). La température du sol peut aussi avoir des effets indirects sur la physiologie des plantes. Un sol humide et sous l'action des très basses températures du début du printemps ou de la fin de l'automne

aura la tendance à former de la glace, ce qui peut causer l'éjection des jeunes plants et leur mort par la suite (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990).

La photosynthèse dépend aussi de l'ouverture des stomates, à travers lesquels les plantes réalisent la plupart de l'échange gazeux avec l'atmosphère. L'ouverture des stomates est contrôlée principalement par l'état hydrique de la plante et par l'humidité de l'air autour d'elle. Quand la plante est sous stress hydrique, elle ferme ses stomates pour prévenir la plasmolyse des tissus, diminuant ainsi sa conductance stomatique, c'est-à-dire sa capacité à absorber du CO_2 et de là, sa capacité photosynthétique (Mooney et Ehleringer, 2009).

Par rapport au transport de nutriments chez les plantes, les racines prennent les nutriments dissous dans l'eau. Une fois à l'intérieur de la plante ces nutriments prennent différents chemins (Lambers, Chapin et Pons, 2008). Par exemple, sous déficience de nutriments, les plantes héliophiles allouent plus de ressources vers les racines pour en produire davantage et ainsi explorer encore plus le sol afin de trouver des sources de nutriments additionnelles (Clancy, Wagner et Reich, 1995 ; Fitter, 2009).

0.2.3 Végétation autour des plants : facilitation et compétition

La facilitation est l'amélioration de la croissance et de la survie d'une plante due aux effets bénéfiques de la présence d'une autre (Callaway et Walker, 1997). Cette interaction est plus évidente lorsque les deux individus poussent dans des conditions de stress (Callaway, 1995). Au contraire, la compétition se présente lorsque deux ou plusieurs espèces (et même des individus de la même espèce) voient leur physiologie (performance) affectée par l'action de l'un sur l'autre (Tilman, 2009).

Après une perturbation (feu, attaque d'insectes, coupe, etc.) l'endroit affecté est généralement colonisé par plusieurs espèces de plantes. Ces plantes affectent positivement ou négativement le développement et l'établissement des plants d'intérêt forestier, qu'il s'agisse de régénération naturelle ou artificielle. En conséquence, l'effet net de la végétation autour des plants déterminera si elle doit être enlevée ou conservée (Holmgren, Scheffer et Huston, 1997).

Une des ressources clefs pour le MEH est la lumière. Ainsi, une végétation de compétition de haute taille et très proche retardera la croissance et la survie des plants (Perron et Mottet, 2010 ; Robbins, 1985). Les études sur la sylviculture du MEH sont rares (Gagné et Paquette, 2008) ; l'unique étude sur la sylviculture du MEH au Québec a été réalisée par Bélanger et Paré (2005) dans laquelle ils ont démontré que le contrôle de la végétation de compétition a un impact positif sur la croissance du MEH. Ainsi, l'utilisation d'un traitement, comme la préparation de terrain, qui retarde l'apparition de la végétation de compétition sera avantageux pour cette espèce (Gagné et Paquette, 2008).

Plusieurs techniques ont été proposées pour tenter de quantifier le degré de compétition, dont certaines dépendent de l'évaluateur (subjectives) tandis que d'autres non (objectives). Towill et Archibald (1991) ont proposé un cylindre imaginaire de 1.13m de rayon dont la hauteur est celle du plant cible. Avec cette technique, l'évaluateur estime visuellement le pourcentage du cylindre occupé par la végétation de compétition. Bilodeau-Gauthier et al. (2011) ont considéré une aire de 1m de rayon centrée sur le plant cible. Ce cercle a été subdivisé en 4 quadrants pour évaluer visuellement, dans chacun le pourcentage de la végétation de compétition et la classer selon les types de plantes (arbre, arbuste, herbacée ou graminée). Le pourcentage pour l'arbre cible était la moyenne des 4 quadrants. Jason et al. (2006) mentionnent deux désavantages des techniques antérieures : la subjectivité et le temps très considérable qu'il faut prendre pour obtenir l'information voulue. La

détermination du pourcentage de couverture par le biais de photographies est une technique utilisée de plus en plus puisque elle est objective et rapide (Jason *et al.*, 2006). À ce jour, il y a plusieurs logiciels de traitement d'images qui, dans une photo, peuvent différencier et calculer le pourcentage de couverture végétale (voir Bold *et al.*, 2010 ; Jason *et al.*, 2006 ; Laliberte *et al.*, 2007 pour d'autres exemples). Il y a aussi les mesures de densité de la végétation dans une aire déterminée tel que l'ont fait Bélanger et Paré (2005). Ils ont proposé deux indices pour mesurer cette variable dans une aire de 1.5 m de rayon (7m^2) où le plant cible est le point central : 1) la somme des distances entre la tige du plant cible et les tiges des plants compétiteurs et 2) le nombre de tiges des plants compétiteurs. L'élection de la technique à utiliser dépend des ressources disponibles, de la grandeur de la surface à étudier et de l'espèce d'intérêt. Jusqu'à présent, dans les cas des MEH, l'information concernant le espace libre de végétation dont il a besoin n'existe pas où est limitée.

0.2.4 La préparation mécanique du terrain

Plusieurs interventions peuvent être appliquées avant la plantation selon les besoins. Par exemple mettre en andain ou éliminer les débris de coupe pour faciliter l'accès des travailleurs, éliminer ou diminuer la végétation de compétition, et/ou travailler le sol (scarifiage) afin de créer des microsites pour les plants, qui favoriseront leur établissement. (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991).

Le scarifiage est un traitement sylvicole qui vise la création de microsites qui favorisent la survie et la croissance des plants (Prévost, 1992 ; Sutherland et Foreman, 1995 ; von der Gönna, 1992) par l'amélioration des conditions de température, d'humidité et de fertilité du sol (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991 ; Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sutherland et Foreman, 2000 ; Sutton, 1993). Cette amélioration est une conséquence directe de l'ameublement du sol, du mélange de la matière organique au sol minéral, de la limitation de la végétation de compétition et de l'exposition du sol minéral (Gagné et Paquette, 2008). Avec le

scarifiage on cherche également à réduire le recours aux coûteux dégagements de la plantation pour les années postérieures à la mise en terre (Gagné et Paquette, 2008).

Il y a plusieurs types de scarifiage : localisé, sur tout le parterre, en sillons, en monticules, ou tout simplement l'enlèvement de la matière organique. Ils varient en fonction de l'objectif fixé (par exemple, retarder le retour de la végétation de compétition, améliorer le drainage d'un sol à tendance humide, etc.), de la machinerie utilisée et/ou disponible (scarificateur à disques, herse, excavatrice, etc.), des caractéristiques de la station, de l'espèce de reboisement, et de l'intensité visée (par exemple, nombre de passages avec la machine, profondeur du traitement, surface du parterre affectés, etc.) (Gagné et Paquette, 2008).

Un terrain scarifié dont le sol minéral (mélangé ou non avec la matière organique) reste exposé subira une hausse de la température du sol grâce à l'action directe de la radiation solaire (sans l'humus en tant qu'isolant) ; également le sol aura une teneur en eau plus élevée due à l'enlèvement de la végétation de compétition ce qui diminue l'évapotranspiration (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Spittlehouse et Stathers, 1990 ; Sutton, 1993). Le réchauffement du sol et l'augmentation de l'humidité dus au scarifiage peuvent avoir un effet positif sur la disponibilité des éléments nutritifs en accélérant la minéralisation de l'azote et en favorisant les réactions d'altération des minéraux riches en calcium, magnésium et potassium. (Prévost, 1992).

Étant donné que le scarifiage limite le retour de la végétation de compétition, il est surtout conseillé de l'appliquer dans les endroits où l'utilisation d'herbicides est interdite ou restreinte (Sutton, 1993) comme c'est le cas au Québec (Thiffault et Roy, 2011) ou sur des espèces qui ne les tolèrent pas comme c'est le cas des mélèzes (Carter et Selin, 1987 ; Robbins, 1985).

Bilodeau-Gauthier et al. (2011) et Czapowskyj et Safford (1993) ont comparé différentes techniques de préparation de terrain sur la croissance de plants de peuplier hybride (*Populus balsamea* x *P. maximowiczii* et *P. maximowiczii* x *P. trichocarpa*). Ils démontrent, en comparant avec des parcelles témoins, que la majorité des traitements augmentent significativement la croissance des plants. Des résultats similaires ont été obtenus par Bedford et Sutton (2000) avec le pin tordu (*Pinus contorta* Dougl.). Par ailleurs, il a été démontré que le scarifiage en forêt boréale au Québec est avantageux pour l'établissement du mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) (Thiffault et al., 2004), de l'épinette noire (*Picea mariana* Mill., Britton, Sterns & Poggenburg) (Thiffault et Jobidon, 2006) et du pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) (Thiffault, Titus et Munson, 2005) ; il a permis une augmentation considérable de la hauteur des plants et du taux de survie. Les résultats plus récents de Thiffault, Titus et Moroni (2010) vont dans le même sens. Cependant, des études réalisées sur les effets du scarifiage suggèrent qu'il doit être fait selon des critères spécifiques à l'espèce et au site à reboiser afin d'obtenir des résultats positifs (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sigouin, 2008 ; Thiffault et Jobidon, 2006 ; Thiffault, Titus et Munson, 2005). Thiffault (2005) par exemple, rapporte qu'en présence d'humus mince, les caractéristiques du sol sont peu influencées par le scarifiage.

Les effets du scarifiage peuvent aussi être négatifs tant pour les propriétés physiques (érosion) et chimiques (perte de nutriments) du sol que pour la performance des plants (Kozłowski, Kramer et Pallardy, 1991 ; Örlander et al., 1998 ; Sutton, 1993). Schmidt, Macdonald et Rothwell (1996) signalent qu'autant la coupe d'arbres que le scarifiage peuvent altérer la composition chimique du sol par la diminution de la disponibilité de l'azote et du phosphore. Le scarifiage peut aussi causer de la compaction, affectant ainsi la densité, le drainage et l'aération du sol, spécialement si ce dernier est engorgé. Bélanger et Paré (2005), dans leur étude sur le MEH réalisée au centre-sud du Québec, ont comparé sa croissance et sa survie (parmi

d'autres éléments) entre plusieurs méthodes de préparation de terrain dont quelques-unes en combinaison avec l'application d'un phytocide. D'après leurs résultats, les plus grandes valeurs de croissance ont été obtenues avec le déblaiement (enlèvement de la végétation de compétition tout en conservant la matière organique) combiné avec le phytocide. Cependant, ce même traitement sans le phytocide était l'un des moins bénéfiques. Si le terrain à préparer a un bon drainage, la création de microsites en monticules ne serait pas le meilleur traitement à appliquer car les microsites auraient un bon drainage et en conséquence, les plants subiraient de stress hydrique (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sutton, 1993). Ces mêmes auteurs ont mentionné qu'un plant mis en terre dans un sol humide pourrait subir du déchaussement à cause du gel au début du printemps ou à la fin de l'automne affectant ainsi sa santé et sa survie. De ce fait, un traitement mal utilisé et/ou un microsite mal choisi peuvent mener à des résultats négatifs.

0.2.4.1 La préparation du terrain en sillons

Cette méthode est souvent réalisée à l'aide d'un scarificateur à disques qui forme des microsites (sillons) propices à la croissance des plants (Dancouse, 2008) (Figure 1.2a-c). Ces microsites sont composés d'un mélange de sol organique, de débris et de sol minéral exposé (Coates et Haeussler, 1987), favorisant l'augmentation de la température, de l'humidité et de la porosité du sol, ainsi que de la disponibilité des nutriments dans le sol (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sutton, 1993).

Plusieurs études rapportent des avantages du scarifiage en sillons pour la croissance et la survie de plants résineux (Macadam et Kabzems, 2006 ; Mattsson et Bergsten, 2003 ; Prévost et Dumais, 2003 ; Sutton et Weldon, 1995, 2003 ; Tellier *et al.*, 1995). Dans le cas de jeunes plantations de MEH, (Bélanger et Paré, 2005) ont observé des résultats positifs de croissance suite à ce traitement et suggèrent qu'il faut prioriser un traitement qui préserve la matière organique du sol.

0.2.4.2 La préparation du terrain en buttes

Il s'agit de la création des microsites en forme de monticules (buttes). Le sol est retourné pour avoir la couche de matière organique en dessous du sol minéral exposé (Figure 1.2e). Ces buttes peuvent être de dimensions et de hauteurs variables selon les caractéristiques du site, la machinerie utilisée et l'essence à planter (Gagné et Paquette, 2008). Cependant, bien que les microsites soient réalisés avec la même machine et sur le même site, leurs propriétés (forme, volume, composition, texture, substrat) ont tendance à varier considérablement (Sutton, 1993). Tout dépend de la nature du site à préparer, notamment la structure du sol, sa profondeur, sa texture, son drainage ainsi que son contenu en matière organique (Macadam et Bedford, 1998). La composition, la stabilité et la fertilité des monticules dépendent donc directement du substrat sous le parterre de coupe (Gagné et Paquette, 2008). Ce type de scarifiage réduit les risques de déchaussement des plants et améliore le drainage dans des sols hydromorphes permettant ainsi aux plants d'accéder à un sol plus aéré. En revanche, dans les sols secs cette technique peut augmenter les risques de dessiccation pour les plants (Haeussler, 1989 ; Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sutton, 1993). Il y aurait aussi un risque pour les planteurs et débroussailliers étant donné la présence des trous (Gagné et Paquette, 2008).

Les buttes sont souvent réalisées à l'aide du Bräcke-Mounder (mound : monticule, en français) (voir Sutton, (1993) pour une description détaillée). Cependant elles peuvent être réalisées pareillement à l'aide d'une pelle excavatrice. Au Québec, par exemple, quelques essais ont été réalisés, notamment dans le cadre de plantations de peuplier hybride avec de résultats positifs (Bilodeau-Gauthier *et al.*, 2011 ; Vanier, 2008). Avec cette machine les monticules sont souvent de plusieurs dimensions selon la taille du godet. En plus, l'excavatrice peut être utilisée sur des sites à topographie variable comme de fortes pentes ou des terrains uniformes. Le

nombre de microsites à l'hectare est également une variable qui peut être facilement contrôlée (Gagné et Paquette, 2008).

0.2.4.3 La préparation du terrain en inversion

L'inversion est une technique de préparation de terrain peu utilisée à ce jour. Cette technique est essentiellement la même que pour la création des buttes sauf que le sol, une fois renversé, est remis dans le trou d'origine (Figure 1.2d). Le sol minéral ainsi exposé aura des conditions physiques et chimiques différentes de celles du reste du parterre forestier (Gagné et Paquette, 2008 ; Hallsby et Örlander, 2004 ; Örlander, Gemmel et Hunt., 1990). Cette technique et celle des buttes permettent, toutes deux, de conserver la couche d'humus intacte sous le sol minéral, plutôt que de mélanger les deux couches (organique et minérale) complètement, par rapport à la technique des sillons. Deux aspects rendent ces techniques intéressantes. Premièrement, le microsite sera libre de compétition car la végétation restera enterrée sous le sol minéral et, deuxièmement, cette couche organique enterrée, deviendra une source importante de minéraux pour les plants (Gagné et Paquette, 2008). Il est important de noter qu'avec l'inversion, le parterre reste au même niveau, sans les trous formés avec le scarifiage en buttes (Figure 1.2) et le travail des reboiseurs et des débroussailliers est ainsi plus sécuritaire (Gagné et Paquette, 2008).

Tant les buttes que l'inversion sont des techniques très intensives mais localisées (partielles). En Suède, l'inversion est de plus en plus appréciée, non seulement en ce qui concerne les valeurs esthétiques et récréatives de la forêt (Gagné et Paquette, 2008), mais aussi en relation aux effets bénéfiques de la portion du parterre non perturbée sur la régénération naturelle (Hallsby et Örlander, 2004). En effet, elle n'affecte que 15 % du parterre forestier (Hallsby et Örlander, 2004).

0.2.5 Profondeur de mise en terre

La mise en terre des plants est un sujet important pour ce projet. Alors que l'on pourrait croire que les techniques utilisées sont éprouvées, pour améliorer la survie et la croissance, il y a encore beaucoup de résistance à adopter de nouvelles techniques qui vont à l'encontre de décennies de pratique au terrain. Planter en profondeur n'est pas accepté (et même pénalisé) au Québec, même si la littérature scientifique suggère que cela ne nuit pas à la performance des plants. Paquette, Girard et Walsh (2011) ont analysé des données de 1 à 20 ans sur la survie et la croissance des plants d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) Britton), Sterns & Poggenb et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) mis en terre à des profondeurs qui variaient entre 0 et 10 cm, dans les régions ouest et nord-ouest du Québec. Ils ont démontré qu'il n'y avait d'effet négatif ni sur la croissance, ni sur la survie si l'on plantait profondément. Bien au contraire, cette approche aidait à améliorer la survie des plants, principalement de ceux de pin gris, grâce à la diminution de l'éjection par le gel. Sahlén et Goulet (2002) ont réalisé une étude sur les façons de contrôler l'éjection par le gel des plants de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et d'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) au nord-est de la Suède. Ils ont conclu que la mise en terre profonde des plants ne contrôle pas cette contrainte. Cependant, ces auteurs n'ont pas indiqué d'effets négatifs sur la croissance de semis plantés profondément par rapport à ceux plantés davantage en surface. De Chantal et al. (2009), dans son étude sur des plants d'épinette de Norvège, suggèrent de planter au moins à 5 cm de profondeur pour diminuer l'éjection par le gel. Örlander, Gemmel et Hunt (1990) et Sutton (1993) ont aussi rapporté que la mise en terre profonde de plants est avantageuse pour minimiser le déchaussement. Enfin, planter en profondeur serait bénéfique puisque les stress causés par le manque d'eau ou le gel, sont plus intenses dans les portions superficielles du sol (De Chantal *et al.*, 2009 ; Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sahlén et Goulet, 2002).

Pour ce projet de recherche, nous avons défini un gradient d'intensité de la perturbation du microsite entre 5 traitements comme suit (voir Table 1.1 et Figure 1.2 pour plus de détails) : simple < double adjacent < double intensif < inversion < buttes. Il est important de noter que l'on parle ici de gradient de perturbation du microsite seulement, i.e. de l'environnement immédiat de croissance des plants. En effet, l'ordre des différents traitements, quant à leurs effets sur l'environnement à l'échelle du peuplement, est différent. Si c'était le cas, les traitements à la pelle mécanique seraient à l'extrémité opposée du gradient de perturbation du microsite puisque ces traitements n'affectent que des surfaces très limitées en superficie et non connectées entre-elles, ce qui limite par exemple leur impact sur l'érosion. En terme d'impact environnemental, les traitements se placent donc plutôt selon l'ordre suivant : inversion < buttes < simple < double adjacent < double intensif.

Les objectifs de ce projet étaient : *i*) déterminer si la réponse des plants était directement proportionnelle au gradient de perturbation du microsite et *ii*) évaluer l'effet de la profondeur de mise en terre sur la croissance et la survie des plants. Nos hypothèses étaient que : *i*) la croissance et la survie des plants seraient proportionnelles au gradient de perturbation, c'est-à-dire que la croissance et survie seraient maximales dans les microsites les plus perturbés; *ii*) qu'en général la croissance et la survie des plants ne seraient affectées, ni positivement ni négativement, par la profondeur de mise en terre, à l'exception des plants plantés profondément dans les traitements en buttes qui auraient une croissance et une survie supérieures à ceux plantés en surface.

0.3 Méthodologie

Les matériels et méthodes utilisés pour ce projet sont présentés de façon détaillée dans la section « Material and methods » du chapitre I.

CHAPITRE I

HYBRID LARCH EARLY PERFORMANCE; EFFECTS OF SITE PREPARATION, PLANTING DEPTH AND LOCAL VARIATION IN ABIOTIC AND BIOTIC CONDITIONS

Mario Buitrago¹, Alain Paquette¹, Nelson Thiffault^{1,2}, Nicolas Bélanger¹, Christian
Messier^{1,3}

¹ Center for Forest Research (CEF), Université du Québec à Montréal

² Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles du Québec

³ Institut des Sciences de la Forêt Tempérée (ISFORT), Université du Québec en
Outaouais

1.1 Abstract

Intensive site preparation is generally recommended to enhance plantation establishment, growth and survival of planted and naturally regenerated seedlings. Although not justified scientifically, deep planting of seedlings is usually discouraged and may even be financially penalized in Eastern Canada. Seedling growth and survival of hybrid larch, a fast-growing and resource-demanding tree species, were evaluated in an experiment of mechanical site preparation and planting depth treatments. Structural equation modelling was used to establish causal relationships between factors influencing seedling performance, including soil water content, soil temperature, surrounding vegetation, and seedling nutrition. A complex array of positive and negative effects of these factors affected seedling growth differently so that no overall differences among treatments on seedling performance clearly emerged. Our results suggest that satisfactory hybrid larch establishment could be met by using either the lowest impact treatment or the cheapest one. As a preventive measure, deep planting could help counteract frost heaving and erosion effects on seedlings, but we found no effect of planting depth on larch performance in this study. Long-term monitoring of soil properties, seedling growth and site preparation treatments capacity to control competition and reduce the need for clearing, would provide more elements to clearly indicate which site preparation and planting depth are best for hybrid larch intensive forestry.

Keywords: Structural equation modelling, nutrition, microsite, hybrid larch, mechanical site preparation, TRIAD

1.2 Introduction

It is generally believed that plantation productivity is positively correlated with management intensity (Lincoln *et al.*, 2006 ; Löf *et al.*, 2012 ; Self *et al.*, 2011). Consequently, most site preparation silvicultural guides advocate the use of intensive soil disturbance to create appropriate microsites for plantation establishment (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Prévost et Thiffault, 2013 ; von der Gönna, 1992). Additionally, it could help reduce the number of expensive treatments such as manual brushing after plantation establishment (Gagné et Paquette, 2008). Soil scarification is recognized to increase soil temperature and moisture which stimulates root growth (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Spittlehouse et Stathers, 1990), and favour organic matter mineralization (Prévost, 1992), whereas vegetation control tends to increase resource availability to newly planted seedlings (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Sutherland et Foreman, 1995 ; Sutton, 1993). Depending on site conditions, target species needs, operational costs and equipment availability, the resulting microsites might be warm, cold, risen, depressed, mainly mineral or mainly organic, etc., affecting seedling growth and survival positively or negatively (Gagné et Paquette, 2008). Furthermore, those silvicultural guides discourage planting the root collar deeper than 3 cm. This practice is sometimes financially penalized in Eastern Canada despite the lack of scientific evidence to support shallow planting (Paquette, Girard et Walsh, 2011). In contrast, studies on conifer (Paquette, Girard et Walsh, 2011) and broadleaf (Gemmell, Nilsson et Welanders, 1996) species have reported no negative (or weak positive) effects of deep planting on seedling growth. Moreover, deep planting may reduce the risk of frost heaving (De Chantal *et al.*, 2009 ; Sahlén et Goulet, 2002), counteract root collar exposition (Paquette, Girard et Walsh, 2011) and improve access to soil water (Sutherland et Foreman, 1995). This is important for plantation productivity because the choice of planting deeper or shallower could determine plantation success.

Vegetation surrounding seedlings is generally undesirable as it could compete with seedlings for growth resources or release allelopathic substances. Nonetheless, some authors emphasize that this vegetation can also enhance seedling growth and survival (Brooker *et al.*, 2008 ; Bruno, Stachowicz et Bertness, 2003 ; Callaway et Walker, 1997 ; Holmgren, Scheffer et Huston, 1997). Although most facilitation studies concern plants growing in deserts or Mediterranean ecosystems, this relation has also been reported in boreal forests. For example in premature to mature stands in boreal forest, Longpré *et al.* (1994) found that jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) stands had larger diameters when growing in mixtures with paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.) than growing in either pure stands or mixture with quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.) (see Callaway (1995) for other examples of facilitation in boreal forests). Facilitation mechanisms induced by surrounding vegetation may include improvements to soil conditions (e.g. moisture, nutrients and structure), regulation of microsite temperature, avoidance of insect attacks and attraction of pollinators (Brooker *et al.*, 2008). Since both facilitation and competition by surrounding vegetation can occur simultaneously, the net effect of surrounding vegetation on seedling growth will determine which effect dominates (Holmgren, Scheffer et Huston, 1997).

Seedling growth and survival are affected by the biotic and abiotic conditions created by different site preparation methods. When these conditions are not optimal, seedlings suffer stress and in turn, their physiology, growth, and survival are affected (Grossnickle, 2005, 2012 ; Margolis et Brand, 1990). For example, a rise in soil temperature could induce a decrease of soil water and hence the closure of stomata, resulting in reduced photosynthesis (Prévost, 1992). However, if soil water availability is not limited and soils are not waterlogged, a temperature increase would be beneficial to the seedlings, as it would stimulate root growth (Kozlowski, Kramer et Pallardy, 1991). Consequently, identifying the mechanisms of possible positive or negative effects of site preparation on seedling performance must always be

accompanied by the specific environmental and site contexts, in short, the microsite characteristics (Brand et Janas, 1988 ; Margolis et Brand, 1990). The microsite should be chosen considering hybrid larch (*Larix x marschlinsii* Coaz) intolerance to shade and waterlogged soil, and its sensitivity to drought and low soil organic content (Bergès et Chevalier, 2001 ; Carter et Selin, 1987 ; Robbins, 1985).

This research is a part of the functional zoning (TRIAD) project in Haute-Mauricie, Eastern Canada, a life-size study of forest management that combines ecosystemic management, intensive forestry and conservation (Messier *et al.*, 2009). Focussing on intensive forestry, we aimed to establish a gradient of mechanical microsite disturbance (i.e. a gradient of resources availability) and a planting depth treatment to test: whether *i*) seedling growth of hybrid larch is directly and proportionally related to microsite disturbance, and *ii*) seedling growth is affected by planting depth. We hypothesized *i*) that hybrid larch seedling growth and survival would be enhanced with increasing microsite disturbance, *ii*) that seedling growth and survival would not be affected by planting depth in general, but *iii*) that deep-planted seedlings in raised microsites (mounds) would have a higher growth and survival than shallow-planted ones. We built structural equation models (SEM) (Lei et Wu, 2007 ; Pugsek et Tomer, 1996 ; Shipley, 2000) to identify key variables and causal paths influencing seedling growth after two growing seasons.

1.3 Material and methods

1.3.1 Study area and site description

The study area is located in south central Quebec (Canada), about 250 km north of Montreal (47°37'19"N, 72°49'55"W), within the balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) – yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.) bioclimatic domain (Saucier, Robitaille et Grondin, 2009). The climate is cold continental with temperate summers, no dry season and a growing season of 170 days (Saucier, Robitaille et Grondin, 2009). From 1971 to 2000, average annual temperature was 3.4 °C; average

annual precipitation was 940 mm, of which 24% fell as snow (Saucier, Robitaille et Grondin, 2009). The site is located on a coarse-textured glacial till deposit 50 to 100 cm-thick. Drainage is moderate and slopes vary between 3% and 15%. The previous stand was dominated by balsam fir, white birch (*Betula papyrifera* Marsh.), yellow birch, red maple (*Acer rubrum* L.) and black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP). The stand was harvested in October 2009 with protection of advance regeneration (5% variable retention cut).

1.3.2 *Experimental design and treatments*

In November 2009, we established an experiment to test the effects of mechanical site preparation and planting depth on growth, survival and physiology of hybrid larch seedlings, a species of interest for high-yield plantations in northern ecosystems (Messier, Bigué et Bernier, 2003 ; Messier *et al.*, 2009). The experimental design is a replicated split-plot (Figure 1.1), with site preparation as the main treatment level and planting depth as the sublevel treatment.

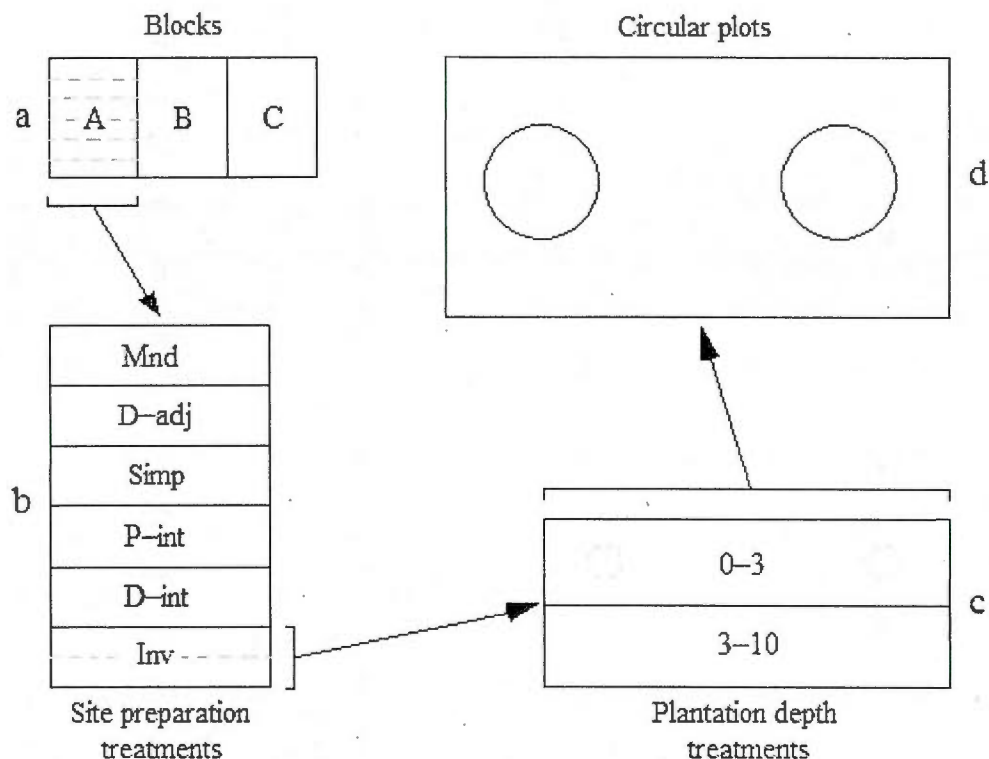


Figure 1.1 Layout of the split-split-plot experimental design with details of one experimental unit. Each block (a) was divided into six main plots (b) which were treated with six mechanical site preparation methods (Simple, Double adjacent, Double intensive, Inversions, Mounds, and Partial intensive (see Table 1.1); the latter is pooled with Double intensive for this study). These main plots were divided again into two subplots (c), which were planted with hybrid larch seedlings at one of the two planting depths (0–3 cm; 3–10 cm). Finally, two circular parcels (d) were established inside each subplot as sampling units. All treatments within plots and subplots were assigned randomly.

The experiment was set using two basic types of mechanical site preparation methods, trenching and mounding, which varied in configuration and intensity. Trenching (Figures 1.2a-c) was performed with two adjustable rotating toothed disks that mixed the organic layer with the mineral soil. Mounding was achieved with an excavator equipped with a 60 cm-wide bucket; the mounds were composed of bare mineral soil on top of the inverted organic layer (Figures 1.2d and 1.2e). We arranged the treatments within three replicated blocks of ~6 ha each (Figure 1.1): Each block was divided into six main plots (~1 ha) to which we randomly assigned one of the

following six mechanical site preparation methods: *i*) Simple (Simp); *ii*) Double adjacent (D-adj); *iii*) Double intensive (D-int); *iv*) Inversions (Inv); *v*) Mounds (Mnd). A full description of each treatment is provided in Table 1.1 along with schematics in Figure 1.2. A sixth method termed Partial intensive (P-int) was also established in the same fashion as D-int except that the machine skipped one pass (two trenchings), thus disturbing only half of the area. The D-int and P-int treatments are not expected to differ in terms of microsite characteristics in the short-term since only the spatial layout of the trenching was changed; differences are expected to appear only in the mid-term, at the plot level. These two methods were therefore grouped as D-int, leaving 5 mechanical site preparation treatments for the purpose of this two-years study. The P-int method will be considered independently in a mid- and long-term monitoring context. All these treatments reduce competing vegetation; trenching by crushing it and mixing it with mineral soil, and mounding by burying it under mineral soil. In consequence, trenching treatments make soil organic content immediately available for seedlings whereas in mounding treatments, seedlings have to reach down to the sandwiched organic layer first. Thus at the seedling (or microsite) level, although very localized and smaller in size, Inv and Mnd treatments are assumed to create harsher microsites for seedlings, Mnd being harsher than Inv because of its elevation from the ground (Figure 1.2 and Table 1.1). Therefore, the resulting soil disturbance gradient at microsite level is assumed to be: $\text{Simp} < \text{D-adj} < \text{D-int} < \text{Inv} < \text{Mnd}$, which would be different at stand level (Table 1.1).

In April 2010, the site was planted with large planting stock of hybrid larch, produced by rooted cuttings (clone MEH-C2-SFD-20/ 3cT- -2003) in 350 cm³ containers at the Grandes-Piles governmental nursery (MRN, Québec). Each main plot (i.e. each site preparation treatment) was divided into two subplots, to which we randomly assigned one of two planting depths: 0–3 cm or 3–10 cm (Figure 1.1c). In the trenching treatments (Simp, D-adj, D-int), planters were instructed to plant the seedlings at the hinge position (trench–berm interface; Figures 1.2a-c; Örländer,

Gemmel & Hunt, 1990). In the Mnd and Inv treatments, seedlings were planted close to the highest point of the microsite (Figures 1.2d-e). Seedlings were planted at least 2 m apart to avoid intra-specific competition during the first few years of growth.

Table 1.1 Description of the five site preparation treatments: Simple, Double adjacent, Double intensive (Double intensive + Partial intensive*), Inversion and Mounds (see also Figure 1.2).

Treatment	Description	Hypothesized disturbance rankings	
		Microsite level	Stand level
Trenching	<i>Applied using a T26 Bracke disk trencher mounted on a skidder</i>		
Simple (Simp)	Conventional single pass of disk-trencher	1	3
Double adjacent (D-adj)	Two disk-trencher passes on the same row. Furrows overlap each other by a few cm, thus producing a wider treated area than the Simp treatment	2	4
Double intensive (D-int)	Two disk-trencher passes on the same row, amplifying disks angle (with respect to the trencher) for the second pass, thus producing deeper, wider and higher treated areas than the Simp and the D-adj treatments	3	5
*Partial intensive (P-int)	Same as D-int, but applied every two rows, thus leaving a 2-3 m-wide unprepared strips between the treated areas	3	<3
Mounding	<i>Applied using a 220 excavator equipped with a 60 cm-wide bucket</i>		
Inversions (Inv)	Bucket excavates and upturns mineral soil, creating an elevated mass (20-30 cm high) roughly conical in form, which is replaced in its original hole	4	1
Mounds (Mnd)	Same as Inv, but the excavated, upturned material lies next to the hole created by the excavation	5	2

Notes: * For the purpose of this study, the seedlings belonging to this treatment were pooled with those of D-int.

1.3.3 Seedling measurements

We established two circular sampling units (8 m radius) in every subplot (Figure 1.1d). All seedlings located within the sampling units were tagged and measured for height (H) and ground-level diameter (D) at the time of planting. Initial seedling dimensions were (mean \pm SD) 38.5 cm \pm 10.0 in H and 4.5 mm \pm 1.0 in D. Seedling dimensions and survival were re-assessed in October 2010 and October 2011.

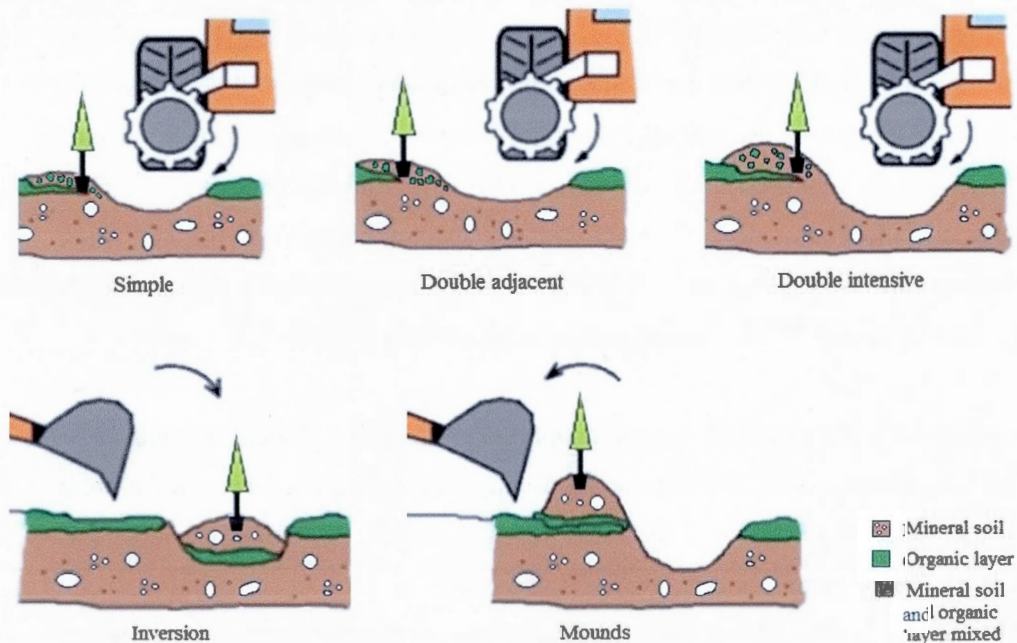


Figure 1.2 Schematic representation of the site preparation treatments: Simple, Double adjacent, Double intensive (including Partial intensive), Inversion and Mounds.

1.3.4 Seedling nutrition and microsite characteristics

Within each sampling unit, we randomly selected and marked four seedlings to perform a detailed assessment of their nutrition and microsite in 2011. For each of these seedlings, we measured current year foliar nutrient (N, P, K, Ca, Mg) concentrations (as a proxy for seedling nutrition), soil temperature and water content as a proxy of the microenvironment of roots, and surrounding competing vegetation as a proxy of competition for resources.

At the end of August 2011, we collected ~50 needles, growing in full sun, from each of the selected seedlings in every sampling unit. Needles were oven-dried at 65 °C for 48 hours, and crushed for 1 min with a vibratory micro mill Pulverisette 0 (Fritsch, Idar-Oberstein, Rhineland-Palatinate, Germany). Digestion was conducted with H₂SO₄-H₂O₂ mixture (Parkinson et Allen, 1975). Nutrient concentrations were determined colorimetrically using Kjeldhal spectrophotometry for N (FIA Quickchem, Lachat, Milwaukee, WI) and inductively coupled plasma analysis for P, K, Ca, and Mg (ICAP-9000, Thermo Instruments, Franklin, MA).

We used a Barnant 115 Thermocouple Thermometer (Model No. 600-2810, Barnant Co., Barrington, IL) to measure soil temperature within a 30 cm radius from each of the selected seedlings in each sampling unit. Soil temperature measurements were taken from temporarily installed thermocouples at 0–3 cm and 3–10 cm. Volumetric soil water content (%) was determined with TDR probes (Field Scout TDR 200, Spectrum technologies, Plainfield, IL) at a constant depth (10 cm). Temperature and water content measurements were taken four times in 2011, between 9:30 AM and 12:30 PM; June 14–16 and 20–22, July 4–5 and August 4–5.

In May 2011, the proportion of vegetation around seedlings was estimated within a circular area of 4 m² ($r = 1.13$ m). We used a Nikon 4500 CoolPix equipped

with a Nikon fisheye converter FC-E8 0.21 x lens (Nikon Corporation, Tokyo, Japan) to take hemispherical photographs facing downwards. Since the highest seedlings and vegetation surrounding them, reached 1.3 m maximum (one year after site preparation) we placed lens 1.6 m aboveground. The 4 m² area was delimited with a red plastic tube circle centered on the seedling and horizontally placed for reference. Using GIMP 2 software (www.gimp.org) and color thresholds, we calculated competing vegetation as the ratio of green to total pixels within the reference circle.

1.3.5 Statistical analyses

Analyses of variance for repeated measurements (ANOVAR) were used to assess treatment effects on survival and seedling dimensions (H and D) over time, with mixed models based on the experimental design. A $P = 0.05$ value, was used as probability threshold. Height was square-root transformed and D was natural-log transformed to meet assumptions of normality and homoscedasticity. For sake of clarity, we present back-transformed data with bias correction for these variables (Ung et Végiard, 1988 ; Végiard et Ung, 1993). ANOVAR were performed with the MIXED procedure of SAS 9.2 (SAS Institute, Cary, NC); a first-order autoregressive covariance structure was selected. The GLIMMIX procedure was used to analyze survival (binomial data).

Given the qualitative and structured natures of the treatments, we used a priori contrasts to compare the linear component of the growth curves in cases of significant ANOVAR results for H and D. We verified whether the linear component was different between 0–3 cm and 3–10 cm depths:

- i) For all of the soil preparation treatments.
- ii) Trenching vs. Mounding.
- iii) Mnd vs. Inv.

- iv) Simp vs. double pass trenching (D-adj and D-int).
- v) D-adj vs. D-int.
- vi) Double pass trenching (D-adj and D-int) vs. mounding (Mnd and Inv).

For these comparisons, we used a probability threshold of $P \leq 0.008$ after Bonferroni's correction to identify significant differences.

For foliar nutrient content and microsite characteristics, analyses of variance (ANOVA) were applied to the subset data (from four seedlings per sampling unit) to assess the effect of both site preparation and plantation depth treatments (a $P = 0.05$ value was used as probability threshold). Using these data, we also built structural equation models (SEM) (Lei et Wu, 2007 ; Pugesek et Tomer, 1996 ; Shipley, 2000) to identify key variables and causal paths influencing seedling height after two growing seasons. We used the lavaan package (version 0.5-10) developed by Rosseel (2012) for the "R" platform (version 2.15.2; The R Foundation for Statistical Computing). Before SEM analysis, we verified normality and linearity of all variables with height. Chi-square tests, an appropriate index for sample sizes such as ours ($N = 288$), and for variables that satisfy normality, were used to evaluate model fit (Hooper, Coughlan et Mullen, 2008 ; Kinney, 2012 ; Shipley, 2000).

1.4 Results

1.4.1 *Seedling dimensions, survival and foliar nutrients*

We detected a significant site preparation \times plantation depth \times time interaction for both height and ground-level diameter, indicating that growth curves were not parallel and that these change with time (Table 1.2; Figure 1.3). Priori contrasts, comparing site preparation treatments and planting depths contributed to those results. For example, seedlings planted at 0–3 cm showed higher height growth in the double-pass trenching treatments (D-adj and D-int) than in the mounding treatments

($t_{5734} = -0.86$; $p < 0.001$), whereas differences were not significant when seedlings were planted deeper ($t_{5734} = -0.43$; $p = 0.669$). As well, seedlings planted in the trenching treatments exhibited higher diameter growth than seedlings planted in the mounding treatments at the 3–10 cm depth ($t_{5729} = -5.15$; $p < 0.001$; Figure 1.3), whereas the increase in diameter was similar for both groups for seedlings planted at the 0–3 cm depth ($t_{5729} = -0.42$; $p = 0.674$). Initial seedling dimensions (height and ground-level diameter) were not significantly different between site preparation treatments. After two growing seasons, seedling height varied from 108 cm (Inv; 3–10 cm depth) to 124 cm (D-adj; 0–3 cm depth) and seedling ground-level diameter varied from 14.2 mm (Simp; 3–10 cm depth) to 17.8 mm (Mnd; 0–3 cm depth) (Figure 1.3). In general, survival was high (89%) with most mortality occurring during the second growing season (10%). About 57% of the dead seedlings were found in poorly drained microsites. Seedling survival appeared to be unaffected by site preparation, plantation depth or their interaction; but seedling mortality was too infrequent for the statistical model (Table 1.2) to converge. Foliar nutrient concentrations were not significantly affected by either site preparation or planting depth (Table 1.3).

Table 1.2 ANOVAR results for hybrid larch growth as influenced by five site preparation methods, two plantation depths and time (initial dimensions plus two growing seasons)

Source of variation (Fixed effects)	Height				Ground-level diameter		
	ndf	ddf	F-value	P-value	Ddf	F-value	P-value
Site Preparation (SP)	4	8	4.78	0.029	8	0.89	0.511
Plantation Depth (PD)	1	10	2.25	0.165	10	9.70	0.011
SP × PD	4	10	1.29	0.339	10	0.26	0.897
Time (T)	2	5734	9406.44	<.001	5729	15356.40	<.001
SP × T	8	5734	13.67	<.001	5729	22.41	<.001
PD × T	2	5734	3.02	0.049	5729	0.58	0.559
SP × PD × T	8	5734	5.19	<.001	5729	5.12	<.001

Notes: ndf = numerator degrees of freedom for height and ground-level diameter; ddf = denominator degrees of freedom.

1.4.2 Soil and microsite variables

Soil water content and soil temperature were significantly influenced by site preparation treatments (Table 1.3). Soil water content was lower in the mounding treatment (Mnd) compared to all other site preparation methods which had similar values. The mounding treatment (Mnd) also differed from the rest of the site preparation methods in terms of soil temperature; it was 1.9 °C warmer in mounds than in the disk-trenching treatments (Table 1.3). Competing vegetation cover was not significantly influenced by site preparation and averaged 48% during the second growing season.

1.4.3 *Structural equation modeling (SEM)*

Based on preliminary correlation analyses between microsite characteristics and seedling dimensions (height and diameter), height was chosen as the most responsive variable. For simplicity and parsimony, the explanatory factors we used in the SEM were: soil temperature, soil water content, percent vegetation cover and a latent variable (a variable that is indirectly determined by directly-measurable variables) composed of significant foliar nutrient concentration values (N, P and Ca). SEM analysis produced significant models of the complex interplay between the explanatory variables and seedling height after two growing seasons, with overall *P*-value (Chi-square) of 0.67 and 0.10 for the 0–3 cm and 3–10 cm models, respectively (Figures 1.4a and 1.4b). Other fit indices also indicated a significant fit (Table 1.4).

Table 1.3 Treatments effects on microsite variables measured in 2011

Variables	Site preparation treatments				P-value and R ² of the model			
	Simp	D-adj	D-int (+P-int)	Mnd	Inv	SP	PD	SP × PD
Foliar N (g/Kg)	18.2(1.2)	17.4(1.2)	16.5(1.1)	18.1(1.2)	16.6(1.2)	0.83	0.83	0.20
Foliar P (g/Kg)	2.6(0.1)	2.3(0.1)	2.4(0.1)	2.4(0.1)	2.5(0.1)	0.45	0.65	0.07
Foliar K (g/Kg)	7.9(0.4)	8.1(0.4)	7.7(0.3)	7.7(0.4)	7.9(0.4)	0.88	0.96	0.21
Foliar Ca (g/Kg)	1.8(0.2)	1.9(0.2)	1.8(0.2)	1.7(0.2)	1.8(0.2)	0.98	0.97	0.45
Foliar Mg (g/Kg)	1.02(0.1)	1.05(0.0)	1.01(0.0)	1.04(0.0)	0.99(0.0)	0.88	0.79	0.59
Volumetric soil water content (%)	39.2(5.1)a	44.1(5.1)a	43.5(5.0)a	28.5(5.1)b	38(5.1)a	***	NA	NA
Soil temperature (°C)	16.6(0.3)a	16.8(0.3)a	17.1(0.2)a	19.1(0.3)b	17.1(0.3)a	***	**	0.50
Cover of competing vegetation (%)	53(0.9)	49(0.9)	39(0.9)	54(0.9)	47(0.9)	0.53	NA	NA

Notes: Data presented as mean (SD). SP = Site Preparation; PD = Plantation Depth; NA = PD was not included as a factor in the ANOVA. For a given variable, means followed by different letters are significantly different at $\alpha = 0.05$, according to a Tukey test. ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$. Mean soil temperature was 17.9(0.2) °C in 0–3 cm, and 16.7(0.2) °C in 3–10 cm. n = 286.

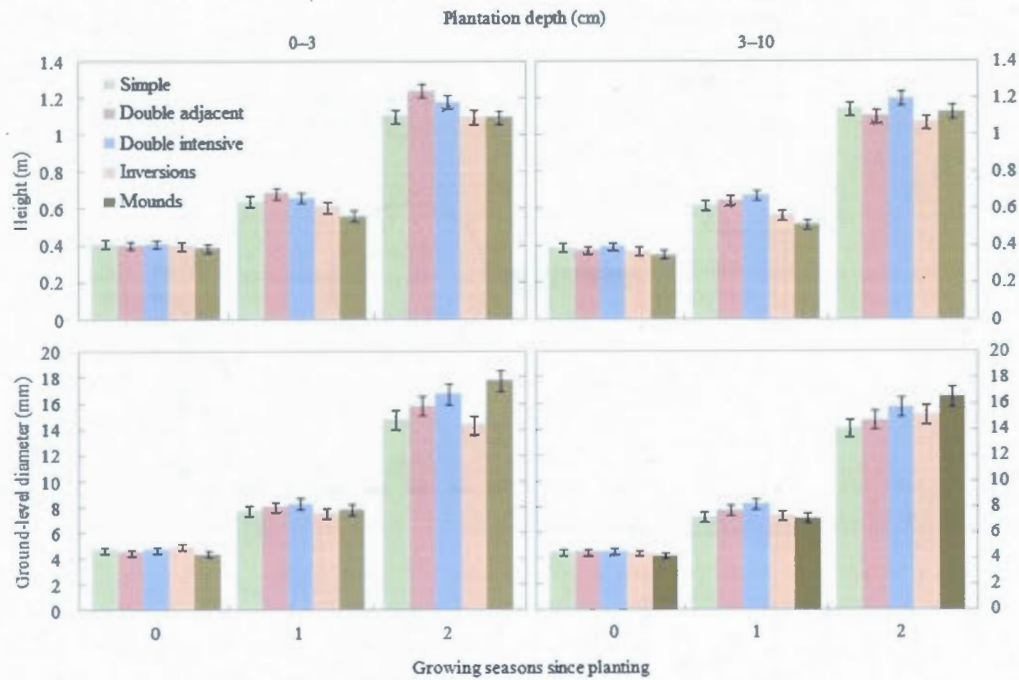


Figure 1.3 Mean height and ground-level diameter of hybrid larch seedlings at time of planting and after first two growing seasons as influenced by site preparation and planting depth. Results are presented as mean \pm SD. See Table 1.1 for description of treatments.

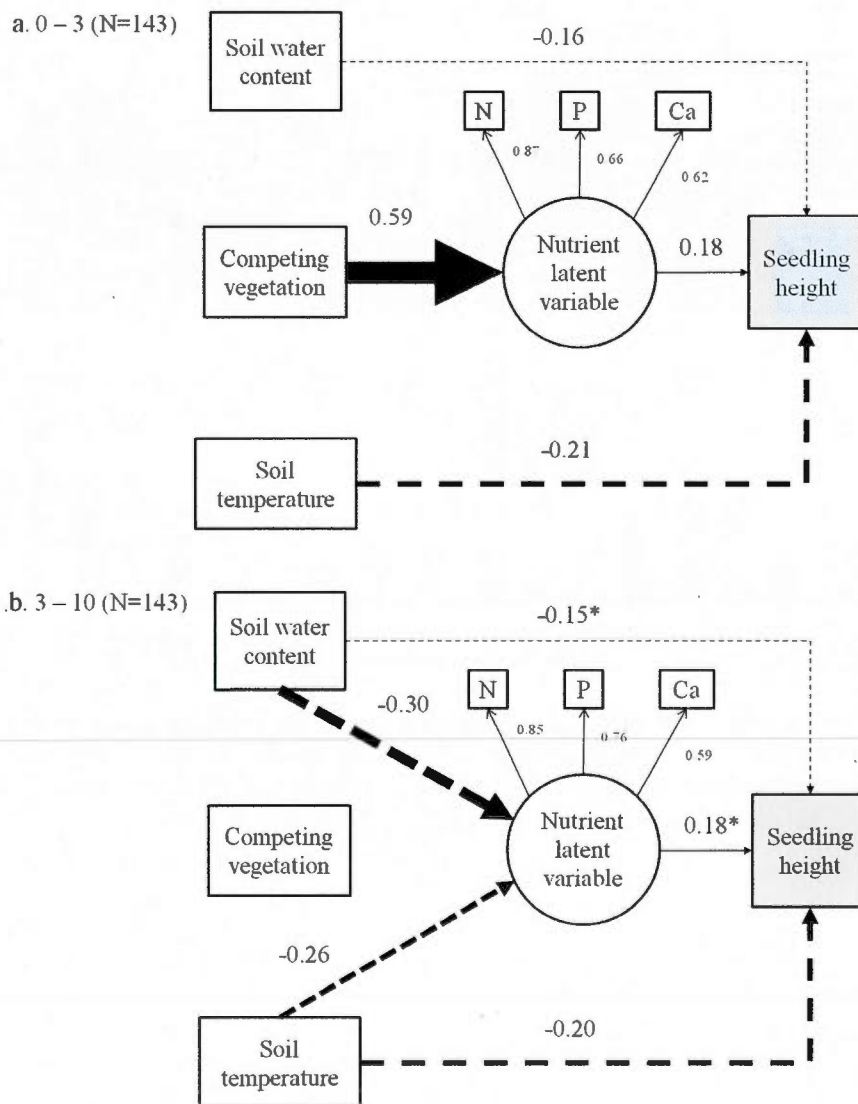


Figure 1.4 Results of structural equation modeling (SEM) analysis applied on a subsample (N=286) of hybrid larch seedlings planted at two plantation depths, a: 0–3 cm and b: 3–10 cm. White squares and circles are factors affecting response variable (Grey squares). The circle represents a foliar nutrient-based latent variable (foliar N, foliar P and foliar Ca). Arrows are causal paths and thickness reflects significance of the coefficients values (0 to 1), with one being the strongest value (solid lines: positive; dash lines: negative). All possible links were tested but only significant ($P < 0.05$) links and their standardized values are presented (* $P < 0.08$). For clarity, error paths are omitted.

All causal pathways differed between seedlings planted at 0–3 cm and those planted at 3–10 cm (Figure 1.4). Notwithstanding the difference in the significance of the coefficients, the main differences between the 0–3 cm and 3–10 cm models resided in the absence of the vegetation cover effect for the deep-planted seedlings. This factor affected the 0–3 seedlings through its positive impact on foliar nutrients. For seedlings planted at 0–3 cm depth, soil temperature and water content directly influenced seedling height, whereas their effect was mainly expressed through a negative impact on seedling nutrition for 3–10 cm planting. Finally, for seedlings planted at 0–3 cm depth, there was a remaining microsite size effect on height that was not expressed through the other variables that were measured.

Table 1.4 Test values and explained variance (R^2) of the SEM model factors (see Figure 1.4), and their effects on height growth of hybrid larch seedlings

Arrows		0–3 cm		3–10 cm	
From	To	R^2	P -value	R^2	P -value
Soil water content	Height	0.10	0.048	0.13	0.070
Soil temperature			0.043		0.015
Nutrient latent variable			0.013		0.075
Competing vegetation			0.414		0.290
Soil water content	Nutrient latent variable	0.35	0.717	0.16	0.001
Soil temperature			0.900		0.003
Competing vegetation			<0.001		0.144
Nutrient latent variable	N	0.76	<0.001	0.71	<0.001
	P	0.43	<0.001	0.58	<0.001
	Ca	0.39	<0.001	0.35	<0.001
Fit indices		P -value		P -value	
Comparative fit index (CFI)		1.00		0.98	
Root mean square error of approximation (RMSEA)		<0.001		0.04	
Standardized root mean square residual (SRMR)		0.05		0.06	

1.5 Discussion

We investigated the response of planted hybrid larch seedlings to a gradient of microsite disturbance and to planting depth. The lack of a strong treatment effect on

seedling growth and survival reflects the contrasting impacts of the treatments on environmental resources. Consequently, a microsite disturbance gradient was not reflected by seedling growth and survival in this study. Although inverting, after 5 growing seasons, has been shown in Scandinavia to increase seedling growth compared to both mounding and disk trenching (Hallsby et Örlander, 2004 ; Örlander *et al.*, 1998), this treatment did not have similar results in the present study. In fact, inverting produced the smallest growth amongst all treatments after two growing seasons. However, the height difference between the least and the most effective treatment combinations (+15%) has no immediate silvicultural consequences, as all would be considered “free to grow” and not require further treatment, given the limited maximum heights of the competitors on this site, pin cherry (*Prunus pensylvanica* L. f.) and raspberry (*Rubus idaeus* L.), estimated at 1.3 meter in 2011). Similarly, deep or shallow planting did not significantly influence seedling size and survival, as had been reported after 20 years for other conifer species in Quebec (Paquette, Girard et Walsh, 2011) and broadleaves species in Scandinavia after 3 years (Gemmell, Nilsson et Welanders, 1996).

Nevertheless, the similar results across experimental treatments have consequences for management. Managers can opt for less expensive options, such as simple disk trenching or site preparation methods with less visual impact, such as inversion, depending on local management constraints, with limited effects on initial plantation performance. However, short-term impacts of site preparation treatments are not always indicative of future trends, as time factor suggests in this study (Table 1.2). Site preparation effects are dynamic and may involve the progressive emergence of competing vegetation or changes in soil nutrient availability through time (Munson, Margolis et Brand, 1993 ; Thiffault *et al.*, 2004).

Overall, our SEM results illustrate that an increase in soil temperature and soil moisture can have deleterious effects on seedling growth. Soil temperature in the

mounds (0–3 cm) treatment reached 27 °C (results not shown), which is well above the optimal soil temperature for root growth of European larch (*Larix decidua* Mill.) (20 °C; Kozłowski, Kramer et Pallardy, 1991). Similarly, root growth of Japanese larch (*Larix kaempferi* (Lamb) Carr.) was found to decline at soil temperatures > 25 °C, compared to cooler conditions (Qu *et al.*, 2009). Given the close phylogenetic relationship of hybrid larch to the abovementioned species (Bergès et Chevalier, 2001), we assume that for shallow planted seedlings (especially in mounds), high soil temperatures directly impaired root functions including water absorption (Boucher, Bernier et Munson, 2001). For deep-planted seedlings, which experienced cooler maximum soil temperatures than shallow planted seedlings (22 °C; results not shown), soil temperature still had a direct negative effect on height, probably through a similar process. The indirect negative impact of soil temperature could be indicative of an effect of temperature on both, nutrient mineralization and uptake by roots. This indirect impact was not apparent for shallow planted seedlings whose roots were growing in warmer soils, which are conducive to greater nutrient mineralization and availability for roots (Prescott, Maynard et Laiho, 2000). The direct negative impact of soil water content on height, although counter-intuitive, is indicative of the species sensitivity to waterlogged conditions.

Unexpectedly, seedling foliar nutrition was positively related to vegetation cover, an effect that resulted in increased seedling height. We attribute this positive relation to two factors. First, both cover vegetation and seedlings were growing in good microsites that provided enough resources with no competition consequences. Second, we suggest a facilitation process (Callaway, 1995 ; Callaway et Walker, 1997); at this early stage of larch growth when nutrient requirements are still low, the input of a non-recalcitrant litter from early successional species and a fast mineralization process could have enhanced soil nutrient availability (MacLean et Wein, 1978). This relation between cover vegetation and seedling nutrition was not observed at deeper planting; but a negative effect of cover vegetation was not

observed either. Our results indicate that seedlings planted deeply are effectively insulated, for the time being, against the influence (positive or negative) of both cover vegetation and higher temperatures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le manque possible de fibres ligneuses au Québec dans les prochaines décennies a motivé l'utilisation de nouvelles techniques d'aménagement de la forêt. Parmi celles-ci, la sylviculture intensive, incluant des plantations d'espèces à croissance rapide est actuellement en évaluation. Pour ce projet de recherche, nous nous sommes intéressés à apporter des connaissances à propos de la performance du mélèze hybride (MEH), selon diverses intensités de préparation mécanique du terrain et différentes profondeurs de mise en terre des plants. Pour ce faire, dans un dispositif expérimental en Haute-Mauricie, nous avons voulu créer un gradient de perturbation du microsite en utilisant cinq méthodes de scarifiage et deux profondeurs de mise en terre.

D'après plusieurs auteurs (Örlander, Gemmel et Hunt., 1990 ; Prévost, 1992 ; Sutton, 1993 ; von der Gönna, 1992), il est évident que la préparation de terrain constitue un traitement important et incontournable pour l'établissement des plants (soit en régénération naturelle, soit mis en terre), car elle mobilise les ressources du sol. Cependant, dans cette étude, la croissance et la survie des plants n'ont été différentes ni entre les cinq traitements de préparation de terrain (c'est-à-dire, pas d'évidence de gradient de perturbation du microsite) ni entre les deux profondeurs de mise en terre. En fait, les différents traitements ont engendré des réponses variées quant aux différentes variables environnementales qui ont été mesurées. Il est important de préciser que la période d'étude est de deux saisons de croissance, une période pendant laquelle les niveaux des ressources ont changé, dû à l'action du scarifiage, et continueront de changer avec le temps. En conséquence, il est possible que des différences importantes aient lieu davantage à moyen terme, ce qui permettra

aux professionnels de la forêt de mieux évaluer la pertinence de la préparation de terrain. Cependant, si les tendances observées dans ce projet se maintiennent, le traitement à mettre en place devrait être soit le moins coûteux ou celui qui a un moindre impact visuel et environnemental.

De plus en plus, l'acceptabilité sociale des plantations attire l'attention des chercheurs, des sylviculteurs et des aménagistes. De nos jours, les gens préfèrent les interventions sylvicoles (plantations, coupes, construction de chemins forestiers, éclaircies, etc.) qui ont le moindre impact visuel et environnemental, ce qui risque de devenir de plus en plus important dans les politiques sylvicoles. Cela a motivé l'apparition de nouvelles façons d'aménager la forêt, comme le zonage fonctionnel (TRIADE), l'aménagement écosystémique (inclut dans la TRIADE) et la toute récente approche qui cherche à aménager les forêts, en tant que systèmes adaptatifs complexes. Ces concepts partagent l'objectif de produire une quantité importante de bois tout en minimisant le plus possible les impacts négatifs d'une telle production sur la biodiversité et la résilience des forêts. Dans ce contexte et dans celui de la sylviculture intensive, deux types de plantations (entre plusieurs autres) font l'objet de recherche dans l'ensemble de la stratégie TRIADE : les plantations mélangées (combinaison de plusieurs espèces forestières sur un même parterre) et celles réalisées en utilisant une préparation minimale du terrain à reboiser comme l'inversion et les buttes (« mounding » en anglais) tout en laissant de la place pour l'établissement d'une certaine régénération naturelle.

Le marché du bois et des fibres continuera d'être important pour la région, mais les nouvelles tendances (et peut-être politiques) vont exiger de plus en plus que ces matières premières soient issues des pratiques forestières respectueuses de l'environnement (e.g. des préparations de terrain moins intensives au niveau du paysage). Cela pourrait faire croire que les bénéfices économiques escomptés ne seront pas atteints puisque ces types de pratiques ne seraient pas capables de fournir

la quantité de matières premières nécessaires (quoique ce sujet est en recherche actuellement dans le projet TRIADE). Cependant ces « bonnes pratiques forestières » ajoutent de la valeur au bois et peuvent attirer davantage des acheteurs intéressés à de nouvelles façons d'aménager les forêts.

Les résultats de cette recherche montrent que les plants de MEH arrivent à bien pousser initialement en utilisant n'importe quel des traitements testés. Ceci signifie que l'attention peut se centrer sur le traitement le moins couteux (simple passage de scarificateur à disque) ou les moins intensifs. Ces derniers sont une bonne alternative par rapport à l'acceptabilité sociale des plantations, puisqu'en plus de rendre disponibles des ressources pour les plants, ils causent moins d'impact sur l'environnement et permettent le développement de la régénération naturelle, autour du microsite, de façon simultanée à la croissance des plants. Concrètement, les traitements en buttes et en inversion (réalisés l'aide de la pelle mécanique) satisfont ces exigences, mais l'avantage de celui en inversion est qu'il est plus sécuritaire pour les reboiseurs et les débroussailliers.

Concernant la profondeur de mise en terre, le fait que les plants en profondeur n'aient pas vu leur croissance ni leur survie être affectées significativement (de façon positive ou négative), semble signifier que les planteurs n'ont pas nécessairement à se soucier de respecter une norme stricte de profondeur. Cependant, pour éviter le danger de planter pas assez profond, il est fort recommandé de planter toujours en profondeur, en faisant attention à choisir un microsite adéquat, par exemple, ne jamais planter dans un endroit propice à l'inondation. Dans ce sens, puisque les buttes et les inversions sont des microsites à tendance sèche, la plantation profonde y est idéale. Cela aide non seulement à éviter le déchaussement et les effets de l'éjection par le gel, mais aussi à que les plants aient un accès plus rapide à l'eau du sol et à la matière organique sous le sol minéral. Ainsi en allégeant les règles quant à la trop

grande profondeur de plantation, on permet aux planteurs de consacrer une plus grande attention à d'autres facteurs plus critiques.

L'utilisation d'équations structurelles nous a permis de mieux comprendre la complexité des interactions entre plusieurs facteurs environnementaux importants et qui affectent soit positivement, soit négativement la croissance des plants. La combinaison des différentes préparations de terrain avec l'une ou l'autre des profondeurs de mise en terre, avec la végétation autour des plants et avec des facteurs comme la température et le contenu en eau du sol ont créé un réseau complexe d'interactions. De plus, les interactions évoluent dans le temps, en fonction des changements du niveau des ressources, et cela se reflète dans les différents types de réponses obtenus selon les traitements de préparation de terrain utilisés. De plus, il est important de mentionner que les analyses dans ce projet ont été faites sur les principaux facteurs qui influencent la performance des plants, mais il en existe potentiellement d'autres que nous ne connaissons pas, et il y a certainement beaucoup de variance locale, accentuée davantage par les préparations de terrain et la profondeur de mise en terre. Par conséquent, les professionnels de la forêt doivent garder en tête que le réseau d'interactions est probablement plus complexe que celui sous étude. Bien que des facteurs comme la densité du sol, les microorganismes, la microfaune, les champignons, la lumière, la matière organique, etc., soient tous des facteurs qui affectent la réponse des plants et conditionnent le choix de la préparation de terrain, ce choix doit reposer aussi sur un ensemble de considérations économiques, écologiques et environnementales.

La période d'étude considérée dans cette recherche a été de deux ans. Dans cette période la réponse des plants a été différente d'une année à l'autre et il est probable qu'elle change encore dans les années qui suivent. Les travaux plus récents de Bélanger *et al.*, (en préparation) qui sont la suite de ceux de Bélanger et Paré (2005) montrent que les réponses des plants de MEH commencent à se stabiliser 6 –

7 ans après la plantation. Ces auteurs suggèrent que ces résultats sont dus à une stabilisation dans le niveau des ressources mobilisées avec la préparation du sol. Nous pensons que les conditions dans notre dispositif seront semblables, donc il sera intéressant de suivre de façon régulière l'évolution des plants et d'évaluer comment les traitements appliqués continuent d'affecter les plants. Il sera intéressant également de mesurer encore une fois certains facteurs (comme la couverture végétale autour des plants) qui, par la courte période d'étude, n'ont pas montré de différences significatives. Nous prévoyons qu'au fur et à mesure que les ressources se stabilisent, la croissance des plants sera dans le sens : buttes > inversions > double intensif > double adjacent > simple, c'est-à-dire, en suivant le gradient que nous avons voulu établir pour cette recherche, et que les plants plantés en profondeur dans le traitement des buttes, auront une croissance supérieure à ceux plantés en surface. Ces hypothèses sont basées sur le fait que les monticules (buttes et inversions), en ayant davantage de sol minéral exposé, procureront aux plants un microsite libre de végétation de compétition plus longtemps que les sillons, et que la couche de matière organique enfouie sous le sol minéral sera une source importante de minéraux pour les racines. Ensuite, les plants en profondeur auront davantage accès à cette couche organique et à l'eau du sol.

Un suivi régulière et à long terme de la croissance et la survie des plants, des propriétés du sol et d'un traitement de dégagement qui est en train d'être mesuré dans le même dispositif, donneront davantage de pistes sur l'efficacité de chacun des traitements pour enrayer la compétition et sur les meilleures préparation de terrain et profondeur de mise en terre pour la sylviculture intensive des MEH. Encore une fois, nous voyons les monticules comme le traitement le plus efficace, tout en permettant aux plants de bénéficier des ressources et gagner en hauteur.

Finalement, à moyen et à long terme, l'attention doit se centrer aussi sur la comparaison (en termes de croissance et de survie des plants, de productivité de

l'écosystème et d'acceptation sociale) entre les traitements partiels (qui ne perturbent qu'une partie du parterre, c'est-à-dire les monticules et le partiel intensif) et ceux qui affectent le parterre au complet. Dans ce contexte, il serait intéressant de comparer l'incidence de la lumière, les communautés de microorganismes, la température et l'humidité du sol, l'état nutritionnel des plants, le développement racinaire et la présence de mycorhizes.

RÉFÉRENCES

- Agrios, G. N. 2005. *Plant pathology*, 5th ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 952 p.
- Beadle, C., et R. Sands. 2004. «Tree Physiology: Physiology and Silviculture». In *Encyclopedia of forest sciences*, J Burley, J Evans et J Youngquist, p. 1568-1577. Amsterdam: Elsevier.
- Bedford, L., et R. F. Sutton. 2000. «Site preparation for establishing lodgepole pine in the sub-boreal spruce zone of interior British Columbia: the Bednesti trial, 10-year results». *Forest Ecology and Management*, vol. 126, no 2, p. 227-238.
- Bélanger, N., et D. Paré 2005. Incidence de l'aménagement du sol sur la productivité et la nutrition juvéniles de mélèzes hybrides en Mauricie, Rapport présenté à Smurfit-Stone, février 2005: 31 p
- Bergès, L., et R. Chevalier. 2001. «Les exigences écologiques des mélèzes». In *Le Mélèze*, Philippe Riou-Nivert, p. 52-59. Paris: Institut pour le développement forestier.
- Bilodeau-Gauthier, S., D. Paré, C. Messier et N. Bélanger. 2011. «Juvenile growth of hybrid poplars on acidic boreal soil determined by environmental effects of soil preparation, vegetation control, and fertilization». *Forest Ecology and Management*, vol. 261, p. 620-629.
- Bold, K. C., F. Wood, P. J. Edwards, K. W. J. Williard et J. E. Schoonover. 2010. «Using photographic image analysis to assess ground cover: a case study of forest road cutbanks». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 163, no 1-4, p. 685-698.

- Boucher, J. F., P. Y. Bernier et A. D. Munson. 2001. «Radiation and soil temperature interactions on the growth and physiology of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings». *Plant and Soil*, vol. 236, no 2, p. 165-174.
- Brand, D. G., et P. S. Janas. 1988. «Growth and acclimation of planted white pine and white spruce seedlings in response to environmental conditions». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 18, p. 320-329.
- Brooker, R. W., F. T. Maestre, R. M. Callaway, C. L. Lortie, L. A. Cavieres, G. Kunstler, P. Liancourt, K. Tielbörger, J. M. J. Travis, F. Anthelme, C. Armas, L. Coll, E. Corcket, S. Delzon, E. Forey, Z. Kikvidze, J. Olofsson, F. Pugnaire, C. L. Quiroz, P. Saccone, K. Schiffers, M. Seifan, B. Touzard et R. Michalet. 2008. «Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future». *Journal of Ecology*, vol. 96, no 1, p. 18-34.
- Bruno, J. F., J. J. Stachowicz et M. D. Bertness. 2003. «Inclusion of facilitation into ecological theory». *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 18, no 3, p. 119-125.
- Burdett, A. N. 1990. «Physiological process in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 20, p. 415-427.
- Callaway, R. M. 1995. «Positive interactions among plants». *The Botanical Review*, vol. 61, no 4, p. 306-349.
- Callaway, R. M., et L. R. Walker. 1997. «Competition and Facilitation: A Synthetic Approach to Interactions in Plant Communities». *Ecology*, vol. 78(7), p. 1958-1965.
- Carter, K. K., et L. O. Selin. 1987. «Larch plantation management in the Northeast». *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 4, no 1, p. 18-20.
- Clancy, K. M., M. R. Wagner et P. B. Reich. 1995. «Ecophysiology and Insect Herbivory». In *Ecophysiology of Coniferous Forests*, W.K. Smith et T.M. Hinckley. London: Academic Press, Inc. 338 p.

- Coates, D., et S. Haeussler. 1987. A guide to the use of mechanical site preparation equipment in north central British Columbia. Canadian Forestry Service, British Columbia Ministry of Forests and Lands: 63 p
- Costello, L.R., E.J. Perry, N.P. Matheny, J.M. Henry et Geisel P.M. 2003. *Abiotic disorders of landscape plants: a diagnostic guide*. Oakland, CA: University of California, Division of agriculture and natural resources, Publication 3420, 242 p.
- Czapowskyj, M. M., et L. O. Safford. 1993. «Site preparation, fertilization, and 10-year yields of hybrid poplar on a clearcut forest site in eastern Maine, USA». *New Forests*, vol. 7, no 4, p. 331-344.
- Dancause, A. 2008. *Le reboisement au Québec. Guide technique*. Coll. «Publications du Québec»: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 177 p.
- De Chantal, M., H. Rita, U. Bergsten, M. O. Löfvenius et H. Grip. 2009. «Frost heaving of *Picea abies* seedlings as influenced by soil preparation, planting technique, and location along gap-shelterwood gradients». *Silva Fennica*, vol. 43, no 1, p. 39-50.
- Fitter, A. 2009. «Nutrient Acquisition». In *Plant Ecology*, M. J. Crawley, p. 51-72: Blackwell Publishing Ltd.
- Gagné, P., et A. Paquette. 2008. Revue de la littérature sur la préparation de terrain mécanique pour les mélèzes. Québec, Réseau Ligniculture Québec: 24 p
- Gemmel, P., U. Nilsson et T. Welanders. 1996. «Development of oak and beech seedlings planted under varying shelterwood densities and with different site preparation methods in southern Sweden». *New Forests*, vol. 12, no 2, p. 141-161.
- Gouvernement du Québec. 1994. «Une stratégie : aménager pour mieux protéger les forêts». *Direction des programmes forestiers, Québec, Ministère des Ressources Naturelles*, vol. Publication FQ 94-3051.

Gouvernement du Québec. 2004. «Rapport final de la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise». Consulté en ligne le 12 avril 2011 sur <http://www.commission-foret.qc.ca/rapportfinal.htm>.

Grossnickle, S. C. 2005. «Importance of root growth in overcoming planting stress». *New Forests*, vol. 30, p. 273 - 294.

-----, 2012. «Why seedlings survive: influence of plant attributes». *New Forests*, vol. 43:, p. 711-738.

Groupe Del Degan, Massé et Associés Inc. 2008. Diagnostic et plan d'action concernant la main d'œuvre dans le secteur forestier. Région Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, Présenté à : Conférence régionale des élus Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (CRÉGÎM), Comité sectoriel de main d'œuvre en aménagement forestier (CSMOAF) et Comité sectoriel de main d'œuvre des industries de la transformation du bois (CSMOITB). 352 p

Haeussler, S. 1989. Mounding for site preparation. British Columbia Ministry of Forests. FRDA Memo No. 100: 12 p

Hallsby, G., et G. Örlander. 2004. «A comparison of mounding and inverting to establish Norway spruce on podzolic soils in Sweden». *Forestry*, vol. 77, no 2, p. 107-117.

Holmgren, M., M. Scheffer et M. A. Huston. 1997. «The interplay of facilitation and competition in plant communities». *Ecology*, vol. 78, no 7, p. 1966-1975.

Hooper, D., J. Coughlan et M. Mullen. 2008. «Structural equation modelling: guidelines for determining model fit». *Electronic Journal of Business Research Methods*, vol. 6, no 1, p. 53-60.

Jason, D. Lusier, William L. Thompson, John M. Wilson, Bruce E. Gorham et Lucian D. Dragut. 2006. «Using digital photographs and object-based image

analysis to estimate percent ground cover in vegetation plots». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 4, no 8, p. 408-413.

Kinney, D.A. 2012. «Mesuring Model Fit.». En ligne.
<<http://davidakenny.net/cm/fit.htm>>. Consulté le 5/11/2012.

Kozlowski, T. T., P. J. Kramer et S. G. Pallardy. 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. San Diego: Academic Press, 657 p.

Laliberte, A. S., A. Rango, J. E. Herrick, Ed L. Fredrickson et L. Burkett. 2007. «An object-based image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography». *Journal of Arid Environments*, vol. 69, no 1, p. 1-14.

Lambers, H, F S III Chapin et T L Pons. 2008. *Plant Physiological Ecology*, 2nd edn. New York: Springer, 603 p.

Lei, P-W., et Q. Wu. 2007. «Introduction to Structural Equation Modeling: Issues and Practical Considerations». *Educational Measurement: Issues and Practice*, vol. 26, no 3, p. 33-43.

Lincoln, M.C., R.E. Will, E.A. Carter, J.R. Britt et L.A. Morris. 2006. «Relationship between tillage intensity and initial growth of loblolly pine seedlings». In *Proceedings thirteenth biennial southern silvicultural research conference*. (Gen. Tech. Rep. SRS-92. Asheville, NC: U.S.), sous la dir. de K.F. Connor, p. 191-194. Gen. Tech. Rep. SRS-92. Asheville, NC: U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.

Löf, M., D. C. Dey, R. M. Navarro et D. F. Jacobs. 2012. «Mechanical site preparation for forest restoration». *New Forests*, vol. 43, no 5-6, p. 825-848.

Longpré, M-H., Y. Bergeron, D. Paré et M. Béland. 1994. «Effect of companion species on the growth of jack pine (*Pinus banksiana*)». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 2, p. 1846-1853.

- Macadam, A., et L. Bedford. 1998. «Mounding in the Sub-boreal Spruce Zone of west-central British Columbia: 8-year results». *The Forestry Chronicle*, vol. 74, no 3, p. 421-427.
- Macadam, A., et R. Kabzems. 2006. «Vegetation Management Improves Early Growth of White Spruce More Than Mechanical Site Preparation Treatments». *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 23, no 1, p. 35- 46.
- MacLean, D. A., et R. W. Wein. 1978. «Weight loss and nutrient changes in decomposing litter and forest floor material in New Brunswick forest stands». *Canadian Journal of Botany*, vol. 56, no 21, p. 2730-2749.
- Margolis, H. A., et D. G. Brand. 1990. «An ecophysiological basis for understanding plantation establishment». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 20, no 4, p. 375-390.
- Mattsson, S., et U. Bergsten. 2003. «Pinus contorta growth in northern Sweden as affected by soil scarification». *New Forests*, vol. 26, no 3, p. 217-231.
- Messier, C., B. Bigué et L. Bernier. 2003. «Using fast-growing plantations to promote forest ecosystem protection in Canada». *Unasylva*, vol. 54, no 214/215, p. 59-63.
- Messier, C., R. Tittler, D. D. Kneeshaw, N. Gélinas, A. Paquette, K. Berninger, H. Rheault, P. Meek et N. Beaulieu. 2009. «TRIAD zoning in Quebec: Experiences and results after 5 years». *The Forestry Chronicle*, vol. 85, no 6, p. 885-896.
- Mooney, H. A., et J. R. Ehleringer. 2009. «Photosynthesis». In *Plant Ecology*, M. J. Crawley, p. 1-27: Blackwell Publishing Ltd.
- Munson, A. D., H. A. Margolis et D. G. Brand. 1993. «Intensive silvicultural treatment: impacts on soil fertility and planted conifer response». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 57, no 1, p. 246-255.

- Örlander, G., P. Gemmel et J. Hunt. 1990. Site preparation: A Swedish Overview. For. Can., For. Resour. Devel. Agree., FRDA. Victoria, B.C., Can. Report 105. 61p, British Columbia Ministry of Forests
- Örlander, G., G. Hallsby, P. Gemmel et C. Wilhelmsson. 1998. «Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies*— 10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden». *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 13, no 1-4, p. 160-168.
- Paquette, A., J-P. Girard et D. Walsh. 2011. «Deep planting has no short- or long-term effect on the survival and growth of white spruce, black spruce, and jack pine». *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 28, no 3, p. 146-151.
- Paquette, A., et C. Messier. 2010. «The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 8, no 1, p. 27-34.
- , 2011. «The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests». *Global Ecology and Biogeography*, vol. 20, no 1, p. 170-180.
- Parkinson, J. A., et S. E. Allen. 1975. «A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material». *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 6, no 1, p. 1-11.
- Perron, M., et M-J. Mottet. 2010. «Les résineux exotiques au Québec choix de *Larix* et *Picea*». In *Choix des espèces pour la mise en oeuvre de l'intensification des pratiques sylvicoles en Gaspésie* (Sainte-Anne-des-Monts, Québec), sous la dir. de Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles. Sainte-Anne-des-Monts, Québec.
- Prescott, C. E., D. G. Maynard et R. Laiho. 2000. «Humus in northern forests: friend or foe?». *Forest Ecology and Management*, vol. 133, no 1-2, p. 23-36.
- Prévost, M. 1992. «Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition : revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec». *Ann. For. Sci.*, vol. 49, no 3, p. 277-296.

- Prévost, M., et D. Dumais. 2003. «Croissance et statut nutritif de marcottes, de semis naturels et de plants d'épinette noire à la suite du scarifiage : résultats de 10 ans». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 33, p. 2097-2107.
- Prévost, M., et N. Thiffault. 2013. «Chapitre 8 – la préparation de terrain». In *Ministère des Ressources naturelles, Le guide sylvicole du Québec – Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture*, Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche; F. Guillemette; P. Raymond et J.-P. Saucier: Les publications du Québec. p 40.
- Pugesek, B. H., et A. Tomer. 1996. «The Bumpus house sparrow data: a reanalysis using structural equation models ». *Evolutionary Ecology*, vol. 10, p. 387-404.
- Qu, L. Y., S. Kitaoka, K. Makoto, M. Kuromaru, M. Osaki, K. Sasa, H. Utsugi et T. Koike. 2009. «Root–shoot communication of the seedlings of Japanese larch and a hybrid species grown in different soil-temperature regimes». *Landscape and Ecological Engineering*, vol. 5, no 2, p. 115-123.
- Rawinski, J. J., J. A. Bowles et N. V. Noste. 1980. Soil properties related to coniferous seedling height growth in northern Wisconsin. Saint Paul, MN, North central forest experimental station - Forest Service-U.S.D.A. Research Note: NC-254: 2 p
- Robbins, K. 1985. «Risks associated with growing non-native larches in eastern North America». *Northern Journal of Applied Forestry*, vol. 2, p. 101-104.
- Rosseel, Y. 2012. «lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling». *Journal of Statistical Software*, vol. 48, no 2, p. 1-36.
- Sahlén, K., et F. Goulet. 2002. «Reduction of frost heaving of Norway spruce and Scots pine seedlings by planting in mounds or in humus». *New Forests*, vol. 24, no 3, p. 175-182.

- Saucier, J-P., A. Robitaille et P. Grondin. 2009. «Cadre bioclimatique du Québec». In *Écologie forestière. Manuel de foresterie*, 2nd ed., Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions Multimondes. Québec, Qc. pp. 186-205.
- Schmidt, M. G., S. E. Macdonald et R. L. Rothwell. 1996. «Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta». *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 76, no 4, p. 531-540.
- Self, A. B., A. W. Ezell, D. B. Hollis et D. Alkire. 2011. «Effect of mechanical site preparation treatments on oak survival in a retired field afforestation effort -- first-year results». In *Proceedings, 17th central hardwood forest conference*. (2010 April 5-7; Lexington, KY; Gen. Tech. Rep. NRS-P-78. Newtown Square, PA: U.S.), sous la dir. de Songlin; Lhotka Fei, John M.; Stringer, Jeffrey W.; Gottschalk, Kurt W.; Miller, Gary W. 2010 April 5-7; Lexington, KY; Gen. Tech. Rep. NRS-P-78. Newtown Square, PA: U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station: 314-322.
- Shipley, B. 2000. *Causal and correlation in Biology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 317 p.
- Sigouin, M-E. 2008. «Évaluation du type de préparation de terrain et de la fréquence des entretiens mécaniques de la végétation compétitrice sur la croissance du peuplier hybride». Montréal, Québec, Département des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal, 79 p.
- Spittlehouse, D. L., et R. J. Stathers. 1990. Seedling microclimate. Victoria, B.C., Land Mange. Rep 65. B.C. Min. For.
- Sutherland, B., et F. R. Foreman. 2000. «Black spruce and vegetation response to chemical and mechanical site preparation on a boreal mixedwood site». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 30, no 10, p. 1561-1570.
- Sutherland, B. J., et F. F. Foreman. 1995. Guide to the Use of Mechanical Site Preparation Equipment in Northwestern Ontario, Canadian Forest Service NWST. Tech. Rep. TR-87, 186 p.

Sutton, R. F. 1993. «Mounding site preparation: A review of European and North American experience». *New Forests*, vol. 7, p. 151-192.

-----, 1995. *Advantages of deep planting black spruce* Trad. de: English. Coll. «Frontline». Sault Ste. Marie, ON, Canada: Canadian Forest Service, 3 p.

Sutton, R. F., et T. P. Weldon. 1995. «White spruce establishment in two boreal Ontario mixedwoods: 5-year results». *The Forestry Chronicle*, vol. 71, no 1, p. 633-638.

-----, 2003. «White spruce establishment in two boreal Ontario mixedwoods: 13-year results». *The Forestry Chronicle*, vol. 79, no 1, p. 127-131.

Tellier, R., L. C. Duchesne, R. S. McAlpine et J-C. Ruel. 1995. «Effets du brûlage dirigé et du scarifiage sur l'établissement des semis et sur leur interaction avec la végétation concurrente». *The Forestry Chronicle*, vol. 71, no 5, p. 621-626.

Thiffault, N. 2005. Choix du microsite sur sol scarifié en forêt boréale – quelques remarques. Hors série. Ministère des ressources naturelles et de la faune. Québec, Direction de la recherche forestière: 6 p

Thiffault, N., G. Cyr, G. Prigent, R. Jobidon et L. Charette. 2004. «Régénération artificielle des pessières noires à éricacées : effets du scarifiage, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans». *The Forestry Chronicle*, vol. 80, no 1, p. 141-149.

Thiffault, N., et R. Jobidon. 2006. «How to shift unproductive *Kalmia angustifolia* - *Rhododendron groenlandicum* heath to productive conifer plantation». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 36, no 10, p. 2364-2376.

Thiffault, N., R. Jobidon et A. D. Munson. 2003. «Performance and physiology of large containerized and bare-root spruce seedlings in relation to scarification and competition in Québec (Canada)». *Annals of Forest Science*, vol. 60, no 7, p. 645-655.

- Thiffault, N., et V. Roy. 2011. «Living without herbicides in Québec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management». *European Journal of Forest Research*, vol. 130, no 1, p. 117-133.
- Thiffault, N., B. D. Titus et M. T. Moroni. 2010. «Silviculture and planted species interact to influence reforestation success on a Kalmia-dominated site – a 15-year study». *The Forestry Chronicle*, vol. 86, no 2, p. 234-242.
- Thiffault, N., B. D. Titus et A. D. Munson. 2005. «Silvicultural options to promote seedling establishment on Kalmia–Vaccinium-dominated sites». *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 20, no 2, p. 110-121.
- Tilman, D. 2009. «Mechanisms of Plant Competition». In *Plant Ecology*, Michael J. Crawley, p. 239-261: Blackwell Publishing Ltd.
- Towill, W. D., et D. A. Archibald. 1991. A competition index methodology for northwestern Ontario. Ontario, Canada, Ministry of Natural Resources - Northwestern Ontario Forest Technology Development Unit. Technical Note 10. 12 p.
- Ung, C-H., et S. Végiard. 1988. «Problèmes d'inférence statistique reliés à la transformation logarithmique en régression». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 18, no 6, p. 733-738.
- Vanier, R. 2008. La petite histoire du peuplier hybride chez Domtar - Windsor, deuxième partie. Progrès Forestier, Publication de l'Association forestière des Cantons de l'Est (AFCE). Août 2008: 18-23 p
- Végiard, S., et C-H. Ung. 1993. «Statistical inference problems related to the logarithmic transformation in regression: another method for interval estimation». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 23, no 5, p. 871-872.
- von der Gönna, M. A. 1992. Fundamentals of Mechanical Site Preparation, British Columbia Ministry of Forests. FRDA. Report 178: 29 p